

千葉県北西部における人工地層・“沖積層”の基準ボーリング調査： GS-CB-8 コアの層相と地層物性層序

Drilling geological survey for establishing standard stratigraphic framework of the Holocene formation and man-made strata in northwestern Chiba Prefecture: Litho- and physical-stratigraphy of GS-CB-8 borehole

風岡 修^{1*}・宇澤政晃²・香川 淳¹・吉田 剛¹・荻津 達¹・八武崎寿史¹・潮崎翔一¹・
中澤 努³

Osamu Kazaoka^{1*}, Masaaki Uzawa², Atsushi Kagawa¹, Takeshi Yoshida¹, Itaru Ogitsu¹, Hisashi
Yabusaki¹, Syoichi Shiozaki¹ and Tsutomu Nakazawa³

Abstract: Drilling geological survey has been conducted for the purpose of establishing stratigraphic framework useful for correlation of a large amount of low quality log data around Tokyo Bay. GS-CB-8 site locates on reclaimed land in the Isobe district, Chiba City where liquefaction-fluidization phenomena caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake occurred. Undisturbed continuous cores were taken from the subsurface up to 60 m depth by rotary drilling with a double-tube sampler. Data of density logging, elastic wave velocity logging, caliper logging and electrical logging were obtained in the drill hole. Lithostratigraphy of the survey site is composed of the Pleistocene Shimosa Group, Holocene formation and man-made strata in ascending order. The Shimosa Group consists mainly of dense sand beds. The Holocene formation consists of a dense sandy lowermost member, a soft muddy lower member, a loose sandy middle member and a soft muddy upper member. Man-made strata consist of the Filling Association and the Damped Association. The Filling Association is composed of the very soft muddy Lower Bundle and the very loose sandy Upper Bundle. Data of density logging, S-wave velocity and electric logging are concordant with litho-facies. It is presumed by observation of continuous cores that the Upper Bundle of the Filling Association was a liquefaction-fluidization layer caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

Keywords: standard stratigraphic framework, Holocene formation, man-made strata, liquefaction-fluidization, Tokyo Bay, 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

要 旨

2012 年東北地方太平洋沖地震の際には、首都圏のウォーターフロントである東京湾岸埋立地北部を中心に液状化－流動化に伴う深刻な被害が生じた。しかし、埋立地のすべてで被害が生じたわけではなく、局所的な現象であった。このような被害予測をより精度よく予測できるようになれば、地質災害予防のための地層改良工事や地質環境条件に見合った現在の土地利用形態の変更を計画的かつ効率的に行えるようになる。こうして災害に強い強靱な国土づくりに貢献できるものになる。

今回の調査は、従来の既存地質（地盤）データの有効活用を視野に入れた基準ボーリング GS-CB-8 の調査結果として、調査地点の地質層序や地層物性、2011 年

東日本大震災時の液状化－流動化層準についてまとめたものである。

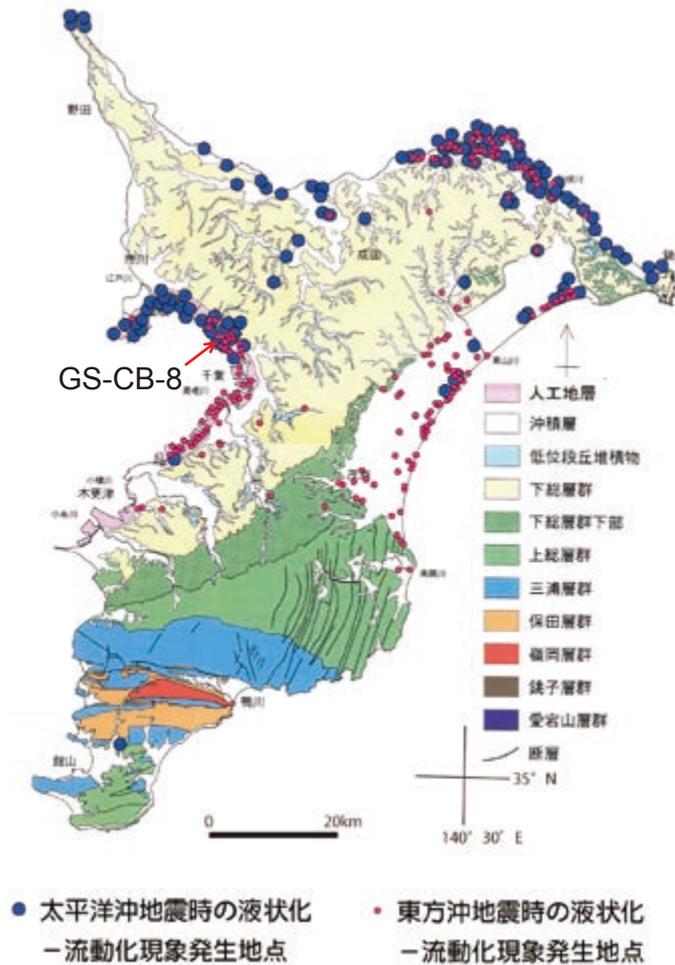
本調査の結果、調査地点の“沖積層”は、砂層主体の最下部層、泥層主体の下部層、砂層主体の中部層、泥層主体の上部層から構成されること、人工地層は埋立アソシエーションと盛土アソシエーションから構成され、特に埋立アソシエーションは厚さ約 10 m あり泥層主体の下部バンドルと砂層主体の上部バンドルから構成されること、これら層相区分は密度や弾性波速度、電気比抵抗分布に影響を及ぼしていること、2011 年東北地方太平洋沖地震時には人工地層のうち埋立アソシエーション上部バンドルの砂層の多くが液状化－流動化した可能性が高いことが明らかとなった。

*Correspondence

1 千葉県環境研究センター地質環境研究室 (Research Institute of Environmental Geology, Chiba)

2 関東建設株式会社 (Kanto Construction Co. Ltd.)

3 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)



第1図 埋立後に起きた地震時の液状化―流動化地点の分布と今回の調査位置。
千葉県環境研究センター（2014）に加筆。

Fig. 1 Distribution of liquefaction-fluidization points by earthquakes after reclamation and drill site of this study. (Modified from Chiba Environmental research Center, 2014)

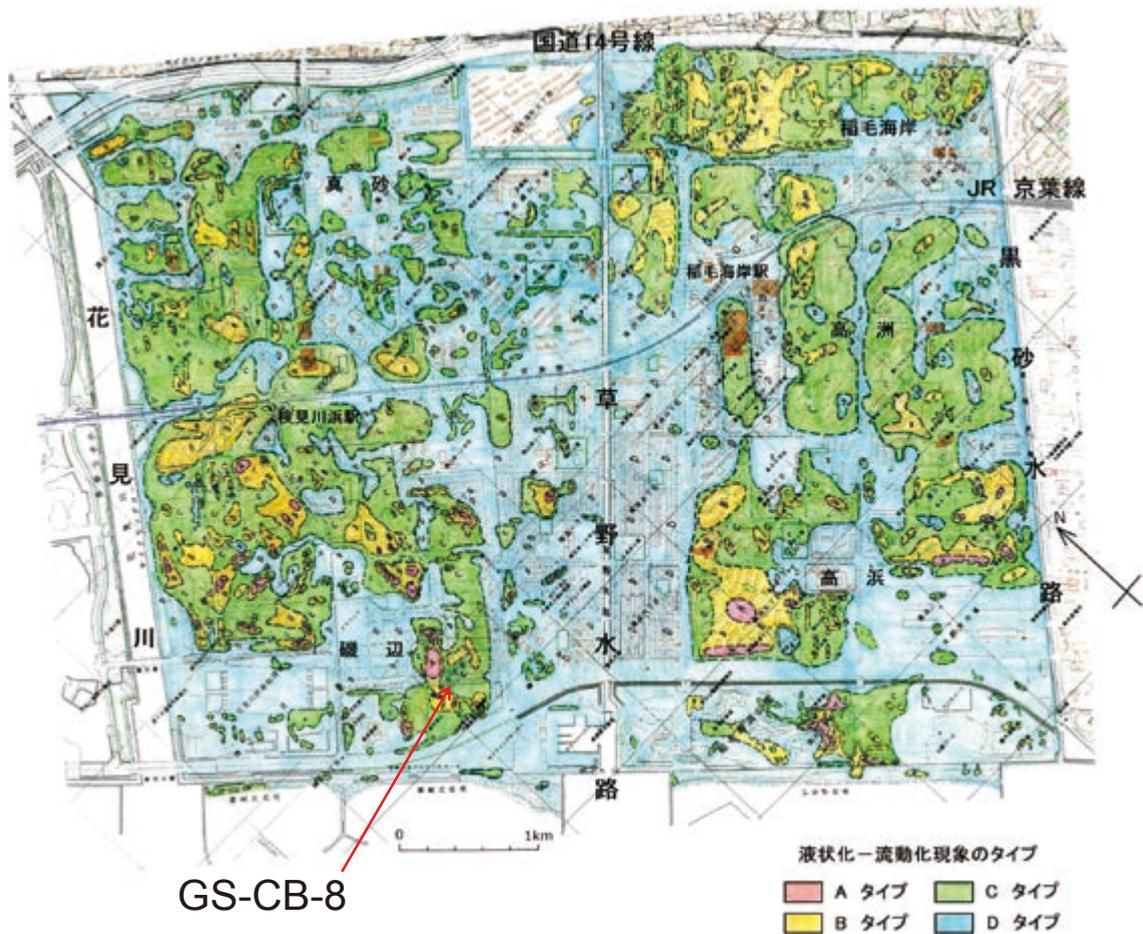
1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震時には関東地方南部では気象庁震度階4～6弱の揺れが広く観測され、平野部を中心に液状化被害が96市町村と広くみられた（国土交通省関東地方整備局・地盤工学会，2011など）。房総半島では、特に埋立地において5強よりも強い揺れがあった地域を中心に液状化―流動化現象による深刻な被害がみられた。特に東京湾岸埋立地では、その全域が均一に液状化―流動化したわけではなく、非液状化対策部分でも同現象が発生しなかった部分も多い。人工地層や“沖積層”の厚さや層相の側方変化はこれらの下位の下総層群に比べて極めて大きい。その現象の平面分布の調査と既存ボーリングデータ及び1987年千葉県東方沖地震での液状化―流動化メカニズム解明調査結果（例えばNirei *et al.*, 1990; 風岡ほか，2000; 風岡，2003など）から、被害分布は人工地層と“沖積層”

の層厚や層相が大きな影響を及ぼしている可能性が高いことが指摘されている（千葉県環境研究センター，2011; 風岡，2011）。

東京湾岸北部の沖積低地や埋立地ではウォーターフロント開発が進んでおり、過去から様々な構造物が作られているため、その基礎設計のためのボーリングが多数行われ、国や自治体のデータは標準貫入試験結果を主とした“地盤ボーリングデータ”が公表されている。しかし、これらデータにおいては地層記載が乏しく、オールコアでないこと、コア試料が残っていないことから、残念ながら地層の対比や地質構造の把握は困難である。また、電気比抵抗や密度、弾性波の伝達速度などの物性データもわずかしかなかく、今回のような地震時における地震動予測、液状化―流動化予測や地下水の状態の把握も困難な場合が多い。

このため現在、産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門と千葉県環境研究センターで



第2図 2011年東北地方太平洋沖地震時の液状化-流動化現象の分布と今回の調査位置。
千葉県環境研究センター（2012）に加筆。

Fig. 2 Classification map of subsidence by liquefaction-fluidization on the 2011 earthquake in the reclaimed land in Chiba city and drill site of this study. (Modified from Chiba Environmental research Center, 2012)

は、千葉県北部の浅層部の地質のリファレンスとして、基準層序ボーリングを実施している（宮地ほか，2015a）。今回のボーリングはその一環として、2011年東北地方太平洋沖地震時に液状化-流動化被害のあった千葉市美浜区磯辺3丁目の千葉西高校の敷地内の東縁の緑地帯にて行った（第1図，第2図）。

2. 地質概要

海上保安庁の海図によれば、千葉市美浜区は、東京湾北東縁に位置し、1970年以前は標高約1～-7mの潮間帯から上部外浜であった。調査地点は1969年時点では標高約-6mであった。調査地点の北東隣の真砂地区は1970～1971年に埋め立てられ、次いで調査地点を含む磯辺地区は1972～1973年に埋め立てられたことが航空写真からわかる（Kazaoka *et al.*, 1992）。なお、埋立は、必要な土砂を埋立部分の沖合の海底の地層から

浚渫し、これを海水と共にパイプを通して埋立部分に流入させるサンドポンプ工法で行った。埋立の後、重機によって建設工事などでの掘削土砂や“山砂”などで盛土をし、整地していった。現在の調査地点の標高は3.74mである。従って、調査地点の地表付近には、盛土層、その下位には深度約10mまでが埋立層、さらにその下位には“沖積層”，更にその下位には下総層群が分布することとなる。

1987年千葉県東方沖地震時には、今回の調査地点の南西に隣接した同高校のグラウンド内にて噴砂が発生していた。しかし、本調査地点では液状化-流動化の現象は特に認められていない。

2011年東北地方太平洋沖地震時には、上記グラウンド内において広範囲に噴砂がみられた。また調査地点の緑地と道路の歩道との境にある擁壁は沈下した（第3図）。調査地付近は、磯辺三丁目部分のタイプA・Bの液状化-流動化に伴う深刻な被害地区の南西縁にあた



第3図 調査地点近傍の擁壁。
高校敷地の北東縁には道路に沿って緑地があり、
これと道路の境にある擁壁が局所的に沈下した。

Fig. 3 Concrete wall near the drill site.
A concrete wall was submerged partially by
liquefaction-fluidization on the 2011 off the Tohoku
Earthquake.



第4図 ボーリング調査地。
ボーリング地点は擁壁の脇 2 m の位置である。

Fig. 4 Drill site.
The drill site was located at a distance of 2 meters from
the concrete wall.

り(第2図), ボーリングは, この沈下した擁壁から約
2 m 離れた緑地帯内で行った(第4図)。

なお, 調査地点の位置は, 北緯 35 度 37 分 37.3 秒, 東
経 140 度 3 分 18.2 秒, 標高 3.74 m である。

3. 調査手法

調査地点では, オールコアボーリングを泥水を使用
したロータリー式オイルフィールド型ボーリングマシ
ンによるロータリー工法で深度 60 m まで全深度の乱れ
の少ないコア地質試料を採取した後, 各種物理検層を
行った。

オールコア地質試料はコア径が 116 mm の円筒形で,
深度方向に 1 m ごとに採取した。深度 0 ~ 11 m は打
ち込み式スリーブ内臓サンプラーによって, 深度 11 ~
60 m はロータリー式スリーブ内臓二重管サンプラーに
よって地層を採取した。採取したコアは, 運搬時に振
動による液状化による地層の乱れを防ぐため, 現地
にて水抜きを行ってから運搬した。また, 地層採取が冬
季であったため, コアが凍結し乱れないように保管し
た。地質柱状図を作成するに当たり, コアを深度方向
に半円形に 2 分し, その地層断面を観察するとともに,
この断面の片方に発泡ウレタン系樹脂(東邦化成工業
ハイセル SAC-100)を水と混合した後染み込ませ, 地
層の剥ぎ取り転写を行い, 転写面とはぎ取られた面も
観察した。

コアの採取後, その孔を利用して電気検層(ノルマル・
マイクロ), キャリパー検層, 密度検層, P-S 検層を行っ
た。なお, 本孔では掘削孔の一部が崩れやすかったた
めケーシングを深度 22 m まで設置した。P-S 検層, キャ
リパー検層, 密度検層はケーシングを設置した本孔の
みで測定した。このため, P-S 検層は地表から深度 24
m まではダウンホール法によって, 深度 24 ~ 60 m は
サスペンション法によって測定した。一方, 電気検層
はケーシング区間はデータを得ることができないため,
別孔を本孔の 1 m 脇に掘り, 測定した。

P-S 検層は, 1 m ごとに測定した。ダウンホール法の
P 波の初動については P 波起震時の水平成分の初同時
から読み取った。また, 深度 0 ~ 5 m については, ケー
シングが 2 重となっていたため, P 波・S 波の測定がで
きなかつたため深度 0 ~ 5 m を一層と仮定し, 5 m 深度
の測定値にみによって算定したものである。ダウンホ
ール法のデータ収録部はジオファイブ製の GeoSEISE-24,
孔内受信機は GEOSTAFF 製の BHG-2 を使用した。サ
スペンション法はデータ収録部が OYO 製の MODEL-
3660C-XPJ, 発振・受信部は OYO 製のサスペンション
PS 検層プローブを使用した。

キャリパー検層と密度検層は, データ収録部は

OYO 製 Geologger-DSS MODEL-3420, キャリパープローブは同社製 MODEL-3973, 密度プローブは同社製 MODEL-3471 を使用した。

電気検層は, データ収録部は OYO 製 Geologger-3 MODEL-5020, プローブは同社製のノルマル電極とマイクロ電極を使用した。なお, 本孔は掘削中に孔壁が崩れやすいところがありケーシングを 22 m まで入れたため, 本孔の側方 1 m 地点で別孔を掘り, 地表から深度 25 m までの電気検層を実施した。検層結果については, 両孔のデータの整合性を検討し, ノルマル検層結果については深度 0 ~ 22.0 m, マイクロ検層結果については深度 0 ~ 22.1 m までの別孔のデータを採用しこれら以深については本孔のデータを採用し接合した(第 5 図)。

4. 地質層序

調査地点の地表より深度 60 m までの地層は, 下位より下総層群, “沖積層”, 人工地層から構成される。以下に各層ごとの層相と地層物性を第 5 図・第 6 図を参考にしながら述べる。

4.1 下総層群

層相: 下総層群は今回の調査深度では 37.93 ~ 60.00 m に分布し, 下部・中部・上部に分かれ, 全体として上方に粗粒化している。

下部は, 深度 48.30 ~ 60.00 m に分布し, ハンモック型斜交層理と推定される一部急角度を伴う低角斜交葉理が発達する泥質分のほとんどない極めて淘汰の良い締まった灰色の細粒砂~極細粒砂層を主体とし, 漸移的に上方粗粒化する。下半部は極細粒砂層が主体であるが厚さ 8 ~ 21 cm の細粒砂層や厚さ 7 ~ 30 cm の粗粒シルト層をまれに挟む。上半部は細粒砂層を主体とする。粗粒砂~極粗粒砂サイズの貝殻片ラミナが, 深度 59.65 ~ 59.73 m, 57.54 ~ 58.59 m, 57.34 ~ 57.46 m にみられる。粗粒砂サイズの発泡の良い白色軽石質火山灰粒子が深度 52.47 ~ 52.56 m と 51.74 ~ 51.82 m に 5 ~ 20 % 散る。深度 50.40 ~ 50.58 m には黒色スコリア質な極細粒砂層が挟まれる。

中部は深度 45.57 ~ 48.30 m に分布し, 灰色の細粒砂層とスコリア質な中粒砂層との互層で全体に斜交葉理が発達し締まっている。中粒砂層は泥質分をほとんど含まず黒色スコリア粒子を多く含み厚さは 21 ~ 92 cm である。細粒砂層は厚さ 29 ~ 46 cm である。

上部は深度 37.93 ~ 45.57 m に分布し, 平行葉理が発達する締まった中粒砂層を主体とするが中央に約 2.6 m の厚さの生物擾乱が著しい火山灰質な中位の硬さの泥層を挟む。中粒砂層は, 泥質分が少なく平行ラミ

ナが発達し, 一部の層準に生痕化石の *Macaronichnus segregatis* がみられる。この生痕化石のみられる層準は, 深度 44.69 ~ 44.87 m, 44.20 ~ 44.43 m, 43.50 ~ 43.85 m, 39.26 ~ 39.40 m である。中粒砂サイズの黒色スコリア粒子が 42.87 ~ 45.57 m と 39.63 ~ 40.23 m に多く含まれる。砂層の色は泥層の上位と下位で異なり, 泥層の上位の深度 37.93 ~ 40.23 m 部分は黄褐色であるが, 泥層の下位の 42.87 ~ 48.30 m 部分は灰色である。中央の泥層は深度 40.23 ~ 42.87 m に位置し, 暗青灰色で生物擾乱が著しい火山灰質な細粒~中粒シルト層で, 生物擾乱に伴う細粒砂のサンドパイプが多数含まれる。42.05 ~ 42.87 m には中粒砂サイズの火山灰混じりのシルト層を, 42.45 ~ 42.66 m の中粒砂サイズの黒色スコリア層が挟まれる。

地層物性: 密度検層の結果, 密度は砂層部分ではほぼ 1.98 g/cm³ である。上部の泥層部分で約 1.97 g/cm³ である。上部の深度 42.87 ~ 45.57 m 及び下部の深度 48.0 ~ 50.5 m では約 2.00 g/cm³ とやや高い。

P-S 検層の結果, 弾性波速度は深度 40.5 m 付近を境に異なる。P 波速度は一般に 1,670 m/s であるが上部の深度 37.5 ~ 40.5 m 部分はやや遅く 1,620 m/s, 深度 40.5 ~ 42.5 m が 1,670 m/s, 深度 42.5 ~ 45.5 m で 1,710 m/s とやや早い。また, 下部の基底の深度 58.5 ~ 60 m は 1,620 m/s とやや遅くなる。S 波速度は一般に 400 m/s であるが, 上部の深度 37.5 ~ 40.5 m 部分はやや遅く 300 m/s, 深度 40.5 ~ 42.5 m が 390 m/s, 深度 42.5 ~ 45.5 m では 420 m/s とやや早い。また, 下部の基底の深度 58.5 ~ 60 m は 370 m/s とやや遅くなる。

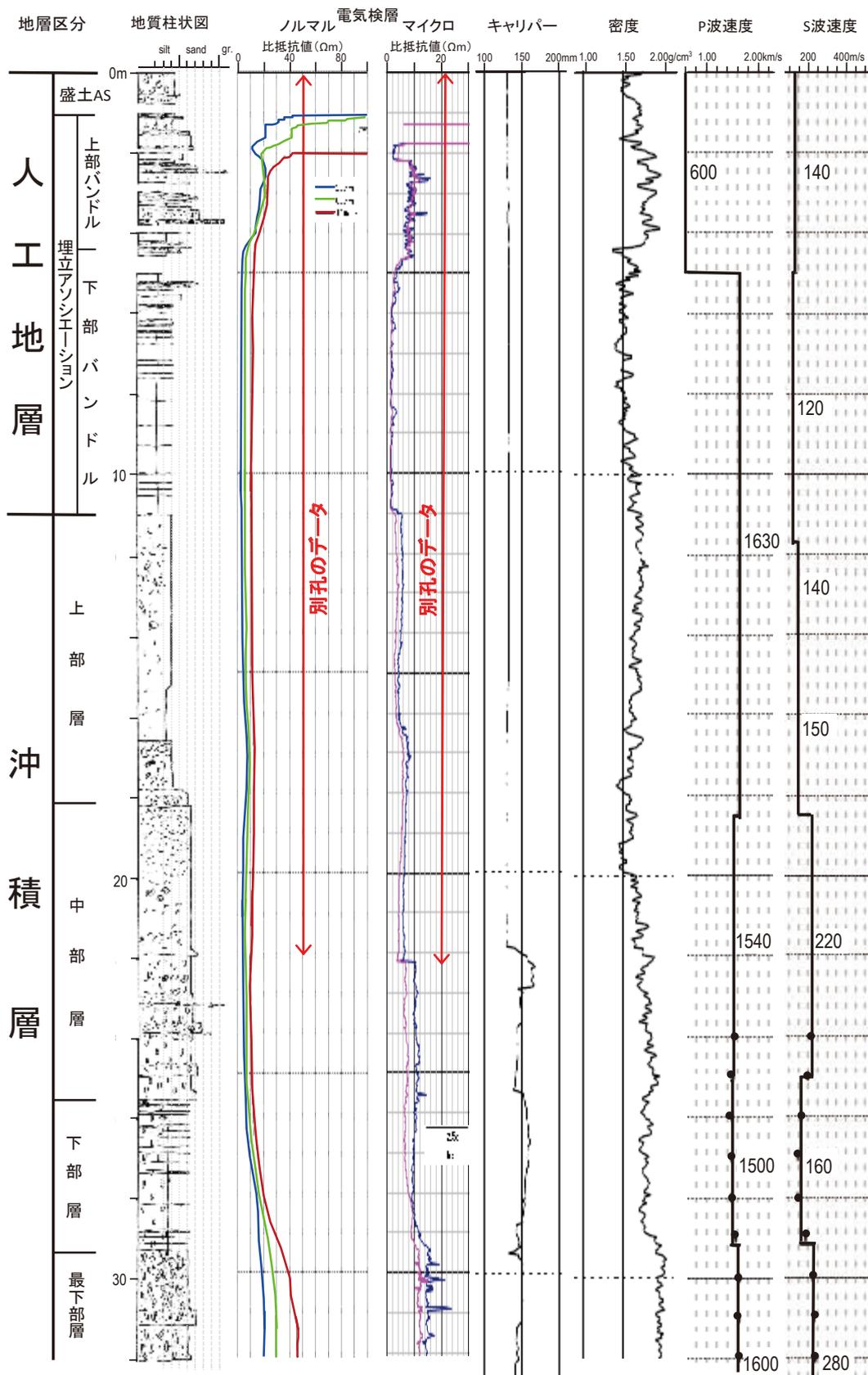
キャリパー検層の結果, 深度 51.7 m 以深の下部の大半は孔径が約 110 mm と掘削孔径よりも狭まっている。深度 46.0 ~ 51.7 m の下部の最上部から中部では孔径が約 115 mm と掘削孔径よりもやや狭まっている。深度 40.3 ~ 46.0 m の上部の下半部は孔径が約 120 mm と若干削孔径よりも狭まっている。深度 37.7 ~ 40.3 m の上部の上半部では孔径が約 130 mm と掘削径と同等である。

電気検層の結果ノルマル検層及びマイクロ検層ともに, 上部の 43 m 付近より上位に比べて下位は電気比抵抗が大きくなる。また, 下部層の深度 48.5 m 付近, 深度 57.5 m 付近で下位ほど急に電気比抵抗が大きくなっていく。特に, 深度 57.5 m 以深では非常に大きくなっている。

4.2 沖積層

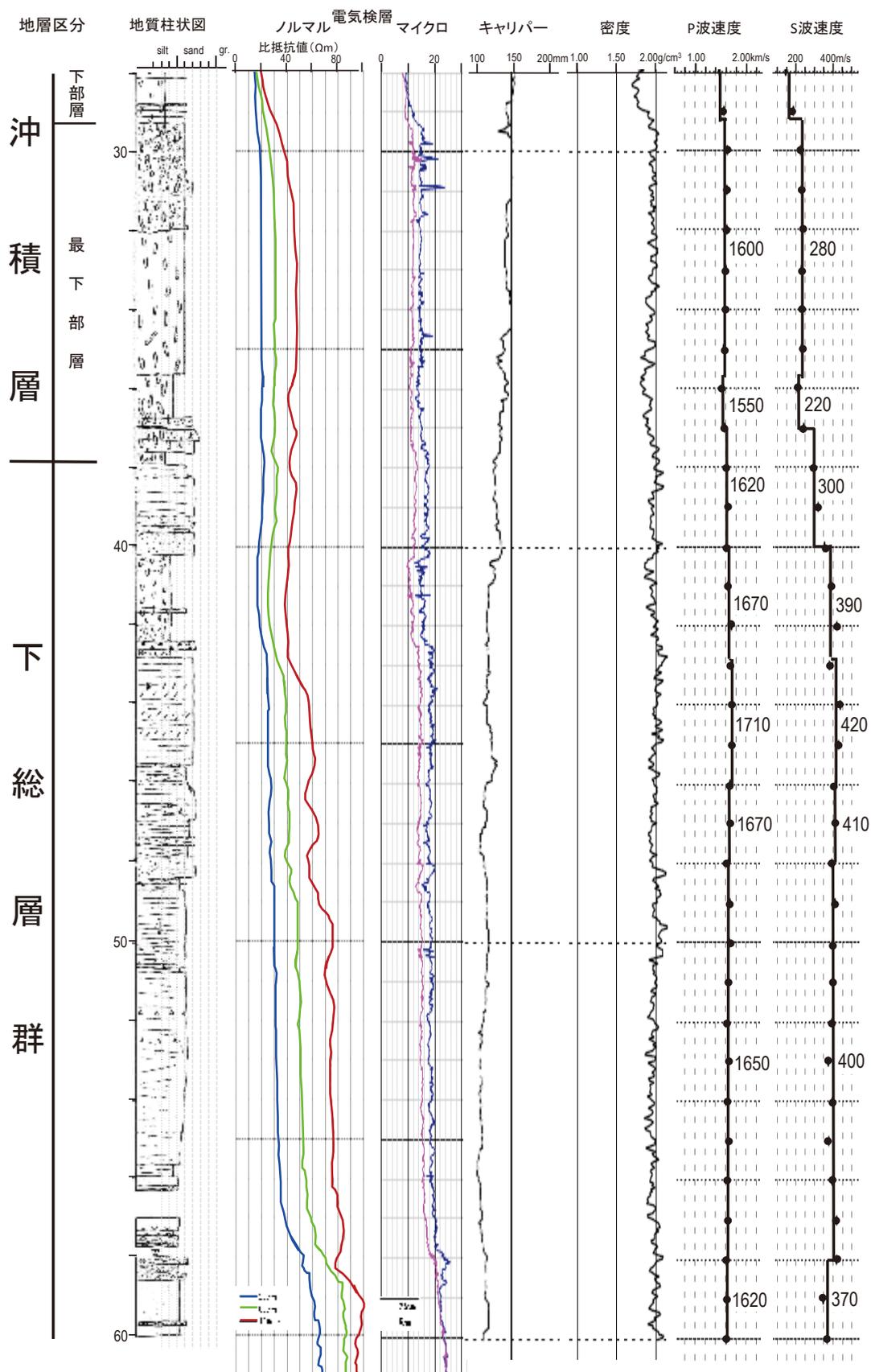
層相: “沖積層”は本調査地点では深度 10.95 ~ 37.93 m に分布し, 砂層主体の最下部層・泥層主体の下部層・砂層主体の中部層・泥層主体の上部層から構成される。

最下部層は深度 29.33 ~ 37.93 m に分布し, 直径 2 ~



第5図 GS-CB-8 コア上半部の地質柱状と各種物理検層結果。
電気検層結果のうち上部は別孔にて測定した結果である。ノルマルは深度0～22.0 m、マイクロは0～22.1 mが別孔のデータで、これよりも下位は本孔のデータである。

Fig. 5 Upper part of geological column and logging data of GS-CB-8 borehole, Isobe district, Chiba City.



第 6 図 GS-CB-8 コア下半部の地質柱状と各種物理検層結果.

Fig. 6 Lower part of geological column and logging data of GS-CB-8 borehole, Isobe district, Chiba City.

10 mm の関東ローム層の礫を 3～7% 含む締まった細粒砂層を主体とし直径 1.5～2 cm 長さ 0.1～0.5 m のシルト壁を持つ大型の生痕化石を多く含み、全体は暗青灰色を呈する。厚さ 0.9～3.7 m の上方細粒化する細粒砂～中粒砂層が積み重なっており、基底部分の中粒砂層部分は薄く 15～35 cm の厚さしかない。深度 36.73～37.62 m には厚さ 20～32 cm の細礫サイズのローム礫を 10～25% 含む中粒砂ないし粗粒砂層が複数枚重なっている。基底部の深度 37.62～37.93 m には細粒砂混じりの黒褐色の有機質なシルト層である。なお、37.77～37.79 m にレンズ状に粗粒砂サイズの発泡の良い白色軽石質火山灰を挟む。

下部層は深度 25.52～29.33 m に分布し、暗青灰色の軟らかい細粒シルト層を主体とする。厚さ 1 m 中に厚さ 2～10 mm の細粒砂層を 3～6 枚の頻度で挟む。直径 3～10 mm、長さ 1～10 cm のサンドパイプ状の生痕化石が多数みられる。深度 25.52～26.5 m に直径 3～12 mm の関東ローム層の礫を 3～10%、貝化石を 2～3% 含む。

中部層は深度 18.22～25.52 m に分布し、上方細粒化する厚さ 0.6～3.7 m のゆるい細粒砂～中粒砂層が複数枚重なっている。全体に貝化石を 3～7% 含む。また直径 3～5 mm の関東ローム層の礫は全体に 2～3% 含むが、基底部の深度 24.65～25.52 cm では礫径が 3～10 mm と大きく 5～7% と多く含むようになる。全体に生物擾乱がみられラミナがほとんど認識できない。深度 23.11～23.12 cm に直径 1～3 mm の発泡の良い白色の軽石を含む。

上部層は深度 10.95～18.22 m に分布し、軟らかい中粒～粗粒シルト層を主体とし上方に粗粒化し砂層の挟みはみられない。全体に直径 0.5～1 cm の貝化石が 3～5% 含まれる。基底付近の深度 16.56～18.22 m には直径 0.5～8 cm の貝化石が 7～25% と多数含まれる。

地層物性：密度検層の結果、密度は、概ね上位ほど低くはなっているが、層準によってふらつく。最下部層では約 1.95 g/cm³ であるが基底部分の 35.5～37.0 m では約 1.88 g/cm³ とやや低い。下部層以浅は急に低くなり、下部層は全体が約 1.79 g/cm³ である。中部層は一般に約 1.76 g/cm³ であるが深度 17.5～20.0 m では約 1.54 g/cm³ と小さい。上部層は下半部が約 1.61 g/cm³、上半部が約 1.70 g/cm³ である。

P-S 検層の結果、弾性波速度は最下部層・下部層・中部層・上部層で異なる。最下部層は基底付近の深度 35.5～37.5 m はこの上位に比べてやや遅く、P 波速度は 1,550 m/s、S 波速度は 220 m/s である。これ以外の最下部層では P 波速度が 1,600 m/s、S 波速度は 280 m/s である。下部層は P 波速度が 1,500 m/s、S 波速度が 160 m と遅い。中部層は P 波速度が 1,540 m/s、S 波速度が

220 m/s である。上部は P 波速度が 1,630 m/s、S 波速度が 140～150 m/s と遅い。

キャリパー検層の結果、深度 35.5～37.7 m の最下部層基底付近では孔径が約 135 mm と削孔径にほぼ匹敵する。深度 28.8～35.5 m の最下部層の主要部分では孔径が約 150 mm と削孔径よりも大きい。深度 25.5～28.8 m の下部層部分では孔径が約 155 mm と削孔径よりもやや広い。深度 23.8～25.5 m の中部層下半部では孔径が約 145 mm と削孔径よりもやや広い。深度 21.9～23.8 m では孔径が約 165 mm と削孔径よりも広がっている。この部分では掘削時でも孔壁が崩れやすかった部分である。21.9 m 以浅はケーシング内なので孔径が約 135 mm と一定している。

電気検層の結果、深度 29 m 付近、22 m 付近、16.5 m 付近で電気比抵抗が変わり、下位ほど電気比抵抗は大きくなる。

4.3 人工地層

層相：人工地層は本調査地点では表層から深度 10.95 m に分布し、埋立アソシエーション*と盛土アソシエーションから構成される。

埋立アソシエーションは深度 1.10～10.95 m に分布し、極軟らかい細粒シルト層を主体とする下部バンドル**と、極ゆるい細粒砂～中粒砂層を主体とする上部バンドルから構成される。

下部バンドルは深度 5.67～10.95 m に分布し、黄灰色の生痕化石がみられない淘汰の良い細粒シルト層を主体とする。このシルト層中には厚さ 1 m の間に 2～8 枚の頻度で厚さ 2～20 mm の灰色粗粒シルト層を挟む。この挟む枚数は上方に向かって増えていく。また、厚さ数 mm～1 cm の基質の黄灰色とは異なる色調の暗褐色の細粒シルト層がしばしば挟まれる。なお、東京湾岸に分布するサンドポンプ工法による泥層においては、淘汰が良く色調の異なる泥層が縞状にみられることがしばしばみられることから、これらの特徴はサンドポンプ工法に特有な層相の可能性がある。

上部バンドルは深度 1.10～5.66 m に分布し様々な粒径の薄い砂層が多数積み重なっている。主な砂層は厚さ 4～27 cm の極細粒砂層・細粒砂層・中粒砂層で、これら砂層中には貝殻が数% 混入するもののほとんどの場合明瞭なラミナはみられず、全体に不明瞭であるか塊状である。まれに厚さ 2～20 cm の細粒シルト層を挟む。また、厚さ 4～9 cm の粗粒砂～細礫サイズの貝殻片を 20% 以上含む中粒砂層を挟む。この砂層は明瞭なラミナがみられる。シルト層は常に灰色であるが、砂層は深度 2 m 以浅では黄褐色 2 m 以深では灰色～オリーブ色である。

盛土アソシエーションは、地表より深度 1.10 m に分

布し褐色のやや硬い砂混じりシルト層とやや軟らかい褐色のローム層から構成される。砂混じりシルト層は深度 0.54～1.10 m に分布し、褐色を呈する。直径 1～2 cm のシルト礫を 15～25 % 含む。地表から深度 0.54 m のローム層は直径 0.5～5 cm の関東ローム層礫を 25～40 % 含む。基質も関東ローム層を砕いたものである。なお、表層から深度 0.1 m は土壌化が進み植物の根を多く含む。

地層物性：密度検層の結果、密度は埋立アソシエーション上部バンドルの深度 4.5 m 付近と盛土アソシエーション基底付近の深度 1.0 m 付近で変わる。深度 4.5～11.0 m の埋立アソシエーション下部バンドル及び上部バンドル基底付近では約 1.56 g/cm³ と調査地点の中で最も低い値である。深度 1.0～4.5 m の人工地層の埋立アソシエーション上部バンドルでは約 1.70 g/cm³ である。地表から深度 1.0 m 付近の盛土アソシエーションでは約 1.60 g/cm³ である。

P-S 検層の結果、弾性波速度は埋立アソシエーション上部バンドル基底付近の深度 5 m 付近を境に変わる。深度 5 m 以深である埋立アソシエーション下部に相当する部分では P 波速度は 1,630 m/s、S 波速度は 120 m/s である。深度 5 m 以浅であるほぼ埋立アソシエーション上部から盛土アソシエーションに相当する部分では P 波速度は 600 m/s、S 波速度は 140 m/s である。

電気検層の結果、ノルマル検層及びマイクロ検層ともに、埋立アソシエーション上部バンドル基底付近の深度 4.5 m 付近を境に、この上位では下位に比べて電気比抵抗が大きい。

(*：人工地層の地層単元に使用されている用語。地層のオーダーの累層に相当する。**：人工地層の地層単元に使用されている用語。地層のオーダーの部層に相当する。アソシエーション及びバンドルは Nirei *et al.*, (2012) によって提唱され、イギリス連邦王国地質調査所などでも人工地層の記載に現在では使用されている。)

5. 地質層序と地層物性との関係とその意義

今回の調査では、第 5 図及び第 6 図や前項の記載から、層相と地層物性が一致している場合が多くみられた。以下に各層ごとに検討する。

5.1 下総層群と“沖積層”の境界付近について

密度検層及び P 波速度については、ともに下総層群と“沖積層”の最下部層は同様な値を示しているが、“沖積層”の下部以浅でともに小さな値となり、“沖積層”の最下部層と下総層群とは同等である。一方 S 波速度は深度 37.5 m 及び深度 40 m で速度が大きく変わる。“沖

積層”と下総層群の不整合境界は深度 37.93 m であり、S 波速度の方が層相と整合的に変化している。なお、深度 37.5～40 m 部分は下総層群の一般的な速度よりも遅く、不整合によって地表に露出している期間に風化の影響があった部分と考えられる。この部分の砂層の色調はこれよりも下位の暗青灰色ではなく黄褐色であることはこの推定を支持している。

5.2 “沖積層”と人工地層の境界付近について

P 波速度では、“沖積層”上部層と埋立アソシエーションにおいて速度の差はみられない。一方、密度検層と S 波速度では深度 11 m 付近の人工地層と自然地層との境である人自不整合（楡井ほか、1994）を境に上位は値が小さく、これら検層は層相と一致する。この層準では S 波速度だけでなく密度も層相の影響を受けていると考えられる。

5.3 下総層群，“沖積層”，人工地層の単元内における砂層部分と泥層部分の密度・弾性波速度の違いについて

第 5 図及び第 6 図より人工地層と“沖積層”のそれぞれの単元内においては、泥層部分と砂層部分を比較すると、泥層部分は砂層部分に比べて密度と S 波速度ともに小さな値となっている。P 波速度は同様な傾向がみられる場合もあるが、みられない場合もある。以上のことから、地層の層相は密度と S 波速度に大きな影響を与えていると考えられる。

一方、下総層群については、密度、S 波速度、P 波速度は砂層部分と泥層部分の明瞭なちがいはみられない。これは泥層内の空隙が人工地層や“沖積層”では大きく、密度や S 波速度にその影響が出やすいのに対し下総層群の泥層では、地層収縮が進み物性的には砂層に近くなるためと推定される。

5.4 電気検層結果と層相

電気検層は地下水開発時に測定される。地下水面下において砂層などの水が移動しやすい地層（透水層）ほど電気比抵抗は大きくなる。この検層データを各層ごとにまとめると以下ようになる。

人工地層内では埋立アソシエーション上部バンドルの砂層が発達する部分は電気比抵抗が高いが、下部バンドルの泥層が発達する部分では電気比抵抗が極めて小さい。地震時の液状化—流動化現象は地下水の存在が不可欠であることから、この上部層において液状化しやすい条件の一つが成立していると考えられる。

“沖積層”内では、中部層は砂層であるにもかかわらず電気比抵抗がこの上位と下位の泥層部分と大きな違いはないが、最下部層の砂層部分から急に大きくなる。

第1表 “沖積層”中の各層基底面標高 (m) の対比.
Table 1 Correlation of stratigraphic boundaries. (Elevation, T.P. m)

地層名	基準面の種類	千葉県立 行徳高校	船橋市立 湊中学校	GS-CB-4	GS-CB-8
地表	地表面	3.07	1.61	3.88	3.74
人工地層	人自不整合面	-2.46	-1.87	-6.87	-7.21
”沖積層”	最上部層基底面	-9.83	-4.69	—	—
”沖積層”	上部層基底面	-22.7	-7.54	-12.57	-14.48
”沖積層”	中部層基底面	-28.23	-13.89	-21.1	-21.78
”沖積層”	下部層基底面	-38.53	-29.48	-32.58	-25.59
”沖積層”	最下部層基底面	-38.63	-34.68	-33.7	-34.19

このことから最下部層は良好な透水層と考えられる。なお、中部層部分についてはマイクロ検層では、この上位・下位の泥層部分よりも高い電気比抵抗となっており、透水性が高い可能性がある。吉田ほか (2012) は、東京湾北東部の“沖積層”には中部付近に地層の塩分の溶出濃度が高い部分を見いだした。このことが原因で中部層の砂層部分の電気比抵抗が低いものと推定される。

下総層群では、上部の厚さ約 2.5 m の厚い泥層を挟んでこれよりも上位と下位で電気比抵抗が大きく変わる。また、下部の基底付近で電気比抵抗が急上昇している。このように下総層群は全体として電気比抵抗が大きく、砂層の粒径が小さいにもかかわらず良好な透水層である可能性がある。また、上部の厚い泥層を境に電気比抵抗が大きく変わることから、この泥層は難透水層としてある程度機能していることも読み取れる。なお、この地点の透水層構造としては上部の厚い泥層よりも上位の砂層部分は“沖積層”の最下部層の砂層部分の電気比抵抗とほぼ連続するため、これらは同一透水層として地下水が流動している可能性が高い。また、上部の厚い泥層部分の電気比抵抗値はこの上位の砂層と比べて低下していないこと、サンドパイプを多く含むことから、難透水性が必ずしも高くはない可能性がある。

6. 東京湾北東部の基準ボーリングコアとの対比

東京湾北東部の“沖積層”において行なわれている複数の基準ボーリング調査の結果、“沖積層”が厚いところでは“沖積層”の中央付近に比較的厚い砂層が常に認められること (宮地ほか, 2015b)、またその堆積年代がほぼ一致すること (宮地ほか, 2016) からこの

砂層はほぼ同時に堆積した砂層で、広く対比が可能なことを示した。本調査地点の“沖積層”の中部層がこれに相当する。

同様な砂層は千葉県環境研究センター地質環境研究室で行った 2011 年東北地方太平洋沖地震時の液状化—流動化のメカニズム解明のためのオールコアボーリング地点である千葉県立行徳高校と船橋市立湊中学校のグラウンドでも認められる (風岡ほか, 2016)。また、今回の調査地点の近傍の沖積谷上で掘削された GS-CB-4 でも認められることから、対比される砂層の上面 (上部層基底) と下面 (中部層基底) との対比結果を第 1 表に示す。なお、この深度は宮地ほか (2015b) の中間ラグ堆積物とは一致しない。なぜならば、このラグ堆積物は淘汰の悪い部分のみであり、ここで述べている中部層はラグ堆積物だけでなく、この上位や下位の砂層部分全体であるためである。また、第 1 表にはこの砂層以外にも、下部層の基底深度と最上部層の基底深度も示した。

なお、GS-CB-4 と GS-CB-8 では、最上部層はみられず、上部層の上位に直接人工地層が重なっている。この 2 か所では、内陸側の埋立を行う際に最上部層部分が浚渫されなくなっている可能性がある。GS-CB-8 地点は、埋立前の海底面の深度は -6 m であったので、本来であれば人自不整合は標高 -6 m にみられるはずであるが、実際は -7.21 m であるので、約 1.2 m 人為的に削られていた可能性がある。

7. 2011 年東北地方太平洋沖地震時に液状化—流動化した層準

Lowe (1975) は、地層中の間隙水の脱水の際に起こる初生的堆積構造の変化様式により、液状化現象と流

動化現象を区別した。風岡ほか（1994）は、1987年千葉県東方沖地震時に発生した巨大噴砂孔のトレンチ調査の際に、実際の地震時の液状化－流動化現象の地中での状態を復元し、Lowe（1975）の脱水に伴う現象が地震時にもあることを実証し、液状化から流動化に至るプロセスを明らかにした。また、ラミナ（初生的堆積構造）が不明瞭となる程度の場合は地層粒子の移動はわずかしかなないので液状化状態まで達し、ラミナが完全に消失ないし新たなラミナが形成している場合は地層粒子の移動は大きく液状化から一歩進んだ流動化状態まで達したと判断した。

今回のコアは、乱れが極めて少なく、地層の剥ぎ取り転写からラミナの状態を検討することができた。コア断面・剥ぎ取り面・はぎ取られ面の観察の結果、“沖積層”部分では初生的堆積構造が不明瞭な部分や消失している部分は認められなかった。“沖積層”の中部層ではラミナが生痕によって乱されているものの、生痕化石自身は不明瞭になったり消失した部分はみられなかったもので、液状化－流動化の履歴は無いといえる。

調査地点において液状化－流動化を最も起こしやすい部分として考えられるのは人工地層である。人工地層は密度やS波速度が他の地層と比べて小さく、特に埋立アソシエーション上部バンドルは電気検層結果から透水層をなすためである。コア等の観察の結果、上部バンドル中の深度1.55～5.66 mの砂層の多くにラミナが不明瞭かラミナの無い塊状部分が認められ、この部分が液状化ないし流動化したものと推定される。しかし、上部バンドルの基底付近の厚さ15 cm以上の泥層が挟まれるようになる深度4 m以深では、コンボリュート葉理がみられ流動変形したことは明らかであるが、この上位の砂層によって変形構造は切られていることから、この変形は人工地層形成時のものと推定される。これよりも上位の砂層については変形構造が上位の砂層に切られていないので、地層形成後の液状化－流動化現象による変形と考えられる。

一方、この地層形成後に発生した比較的規模の大きな地震としては、1987年千葉県東方沖地震と2011年東北地方太平洋沖地震があげられる。1987年千葉県東方沖地震時には、隣接するグラウンドの一部で噴砂が生じたが、この緑地内では噴砂はみられておらず、緑地の北東の縁に沿う護岸にも変形は全く見られなかった。このことから、この際には液状化－流動化は調査地点では発生しなかったものと推定される。これらのことを合わせると、上部バンドル内の深度1.55～4.00 mにみられる液状化－流動化部分は2011年東北地方太平洋沖地震によるものと推定される。

8. まとめ

千葉市美浜区磯辺3丁目で行った基準ボーリングGS-CB-8の調査の結果、以下のことが明らかとなった。

1. 調査地点での地表から深度60 mまでの地質層序は以下のとおりである。下位より深度37.93 m以深に下総層群、深度10.95～37.93 mに“沖積層”、深度10.95 m以浅に人工地層が分布する。“沖積層”は最下部層、下部層、中部層、上部層から構成され、各層の上面深度は29.33 m、25.52 m、18.20 m、10.95 mである。人工地層は埋立アソシエーションと盛土アソシエーションから構成され、その境界深度は1.10 mである。埋立アソシエーションは下部バンドルと上部バンドルから構成され、その境界深度は5.66 mである。
2. “沖積層”の各層は既存のオールコアボーリング地点である市川市の埋立地に位置する千葉県立行徳高校、船橋市の埋立地に位置する船橋市立湊中学校、千葉市美浜区豊砂の幕張海浜公園内の埋立地に位置するGS-CB-4と対比することができた。ただし、本地点とGS-CB-4地点では最上部層は確認できなかった。
3. 下総層群、“沖積層”、人工地層の地層物性値として密度、P波速度、S波速度、電気比抵抗の検層データを得た。特に“沖積層”と人工地層ではこれら物性値は層相の変化とよく対応している。
4. 層相と電気比抵抗から調査地点の透水層構造を把握することができた。
5. 2011年東北地方太平洋沖地震時に液状化－流動化した部分は人工地層内の埋立アソシエーション上部バンドル内の深度1.55～4.00 mの砂層部分と推定された。

謝辞：本調査を進めるに当たり、千葉県立千葉西高校の事務職員の方々には調査にあたっての便宜をいただいた。千葉県環境研究センターのセンター長・次長・室長・地質環境研究室員の方々からは本調査にあたりさまざまな便宜をいただいた。これらの方々に感謝いたします。

文 献

- 千葉県環境研究センター（2011）千葉県内の液状化－流動化現象とその被害の概要及び詳細分布調査結果（第3報）－浦安地区（1）－。千葉県環境研究センター，調査研究報告，G-8，3-1-3-25。
- 千葉県環境研究センター（2012）平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による液状化－流動化現象と詳細分布調査報告（第5報）－千葉市美浜区東部－，（2012年8月30日公表）。千葉県環境研究センター，調査研究報告，G-8，5-1-5-8。

- 千葉県環境研究センター (2014) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による液状化－流動化現象と詳細分布調査結果－第 6 報平成 25 年度地層断面調査結果速報－. 千葉県環境研究センター, 8p, <https://www.pref.chiba.lg.jp/wit/chishitsu/ekijoukahoukoku/documents/6-2.pdf>
- 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会 (2011) 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書. 65p.
- Kazaoka, O., Kusuda, T., Kamura, K., Nirei, H., Ishihara, K., Yoshida, Y., Sato, M., Saito, K., Kazato, T., Kagawa, A., and Morisaki, M. (1992) The relations among N blow of standard penetration test, N_{sw} value of Swedish weight sounding test and grain size of sedimentary beds -Example of hydraulic filled land in Chiba-. Proceedings of the 2nd Symposium on Geo-Environments, *The committee of environmental geology*, Geological Society of Japan, 261-266.
- 風岡 修・佐藤光男・楠田 隆・香村一夫・風戸孝之・香川 淳・森崎正昭・佐藤賢司・古野邦雄・酒井豊・加藤晶子・楡井 久 (2000) 局所的な表層地質の違いが液状化－流動化に与える影響－東京湾岸埋立地の例－. 第 10 回環境地質学シンポジウム論文集, 33-38.
- 風岡 修 (2003) 液状化・流動化の地層断面. *アーバンクボタ*, no.40, 6-12.
- 風岡 修・楠田 隆・香村一夫・楡井 久・佐藤賢司・原 雄・古野邦雄・香川 淳・森崎正昭 (1994) 液状化－流動化のメカニズムとその実態. 日本地質学会第 101 年総会・討論会 講演要旨, 125-126.
- 風岡 修 (2011) 人工地層のでき方と液状化－流動化被害. シンポジウム「人工改変地と東日本大震災」資料集, 地質汚染－医療地質－社会地質学会, 1-21.
- 風岡 修・宇澤政晃・檜山知代・荻津 達・八武崎寿史・香川 淳・吉田 剛・加藤晶子・本田恵理・小倉孝之 (2016) 東京湾北部の埋立地における人工地層～“沖積層”の層序と 2011 年東北地方太平洋沖地震時の液状化－流動化現象：船橋市日の出町・市川市行徳での調査から. 第 26 回環境地質学シンポジウム論文集, 35-38.
- Lowe, D. R. (1975) Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, **22**, 157-204.
- 宮地良典・小松原純子・風岡 修・吉田 剛・中島 礼 (2015b) 東京湾岸千葉県北西部沖積層中のラグ堆積物. 日本地質学会 2015 年大会講演要旨, 304.
- 宮地良典・小松原純子・中島 礼 (2015a) 千葉県北西部の沖積層基準ボーリング調査. 平成 26 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.68, 61-71.
- 宮地良典・小松原純子・中島 礼 (2016) 千葉県北西部の沖積層基準ボーリング調査 (平成 27 年度掘削資料とその対比). 平成 27 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.71, 79-90.
- 楡井 久・佐藤賢司・鈴木喜計・古野邦雄 (1994) 環境における地質単元. *地質学雑誌*, **100**, 425-435.
- Nirei, H., Kusuda, T., Suzuki, K., Kamura, K., Furuno, K., Hara, Y., Satoh, K. and Kazaoka, O. (1990) The 1987 East off Chiba Prefecture Earthquake and its Hazard. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no.35, 31-46.
- Nirei, H., Furuno, K., Kazaoka, O., Marker, B. and Sakunas, J. (2012) Classification of man made strata for assessment of geopollution. *Episodes*, **35**, 333-336.
- 吉田 剛・栗原正憲・風岡 修・加藤晶子・楠田 隆・古野邦雄・香川 淳 (2012) 千葉県における東京湾岸の埋立地層・自然地層の地下水位と地下水中の塩化物イオン濃度について. 第 22 回環境地質学シンポジウム論文集, 83-86.