

東京低地付近の沖積層を例とした沖積層研究の新展開

Recent Progress on the Geological Study of the Chuseki-so in the Tokyo Metropolitan Area as a Case Study

木 村 克 己 (きむら かつみ)

独産業技術総合研究所 主幹研究員

石 原 与四郎 (いしはら よしろう)

福岡大学 助教

1. はじめに

日本の大都市圏は比較的広い沖積低地が発達する臨海平野部に位置している。こうした沖積低地の地表付近の地盤は最新期に形成された沖積層で構成されており、大部分は軟弱地盤地域にあたる。本論では、沖積層を最終氷期最盛期の海水準が低下したときに形成された開析谷を埋積してできた地層という意味で用いる^{1),2)}。

沖積層は表層部の軟弱地盤を構成するため、地盤工学的にも重要視されている。地盤の工学的特性は、地層の堆積環境や堆積年代、続成作用の履歴により左右されるため、特定の工学的特性が発現する原因やその機構を考える上で、沖積層の詳細で正確な地質学的な理解が不可欠である^{3),4),5)}。

沖積層の地質学的研究は、新たな技術の導入をきっかけにこの10年あまりで急速に展開している。すなわち、加速器質量分析装置を用いた高精度な放射性炭素年代法の普及^{6),7)}、堆積システム・シーケンス層序に基づいた地層形成プロセスの解明⁸⁾、大量のボーリングデータの数値統計処理による3次元数値モデル構築と定量的解析^{9),10)}、などの強力な研究手法が広まりつつある。沖積層の層序は、下部の七号地層と上部の有楽町層に2分され、両層は不整合関係にあると理解されてきた^{11),12),13)}。しかし、最新の研究成果は、沖積層が1回の海進・海退により形成された一連の地層であることを示す^{14),15)}。

地質学的研究の新展開は、地盤工学的研究に大きな影響を与えるであろう。層序の改訂だけでも、工学的特性の発現機構について抜本的な見直しをせまることになる。例えば、沖積層下部は過圧密で上部は正規圧密であることが多く^{3),4)}、その他の含水比や湿潤密度等の土質特性の違いも含めて、これらの相違の要因が不整合であることに関連付けられがちであった。しかし、今後は、堆積環境・堆積相、それに起因する堆積物の組成とファブリックの違いや地質学的な時間履歴などの視点が新たに必要となる⁵⁾。

本論では、地質学に関する最新の研究手法とその研究成果として、産業技術総合研究所の都市地質研究プロジェクト¹⁶⁾で実施している東京低地付近の沖積層の事例を紹介する。

2. 沖積層の調査法と東京低地付近の沖積層

東京低地付近では、平野地下に伏在する沖積層の層序・堆積相区分の確立、堆積環境の変遷や形成過程の解明を目的に、ボーリング調査によるオールコアの採取とコアの高精度解析、ボーリングデータの収集・データベース化、S波ランドストリーマー探査などの物理探査による地下構造のイメージング、などの研究調査を実施している¹⁶⁾。図-1に東京低地付近の沖積層基底等高線図¹²⁾とオールコアのボーリング地点を示す。ここでは、これらの研究調査のうち、前2者の概要を紹介する。

2.1 コア試料の高精度な解析

オールコアの堆積物試料の採取と高精度解析は、層序・堆積相・堆積物物性の標準を確立するために行われる^{17),18)}。まず、コアを半裁する前に、非破壊測定器(Multi Sensor Core Logger (Geotek 社製))を用いてコア試料の γ 線透過率および帯磁率を測定し、湿潤密度・粒度の指標となる連続した数値情報を得る。コア試料の観察は、コアの半裁断面だけでなく、内部堆積構造の詳細まで把握するために、軟X線写真画像とはぎ取り試

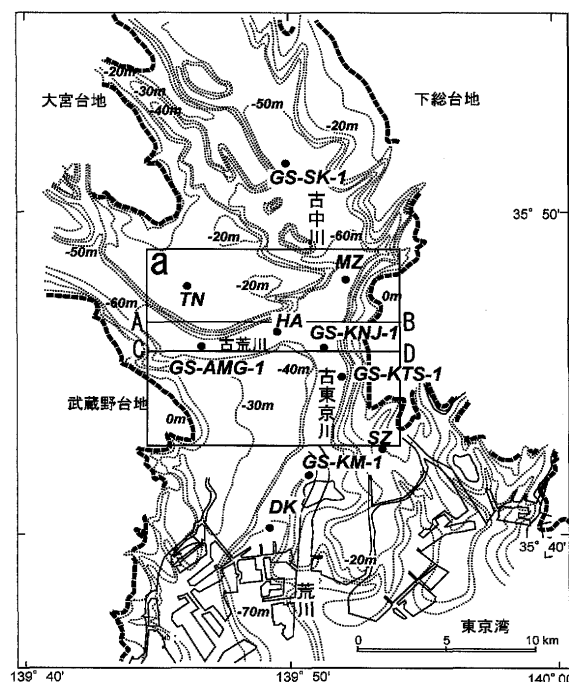


図-1 東京低地付近の沖積層基底等高線分布¹²⁾とコア地点

料を作成して行われる。堆積環境の指標として、貝化石と珪藻化石の同定、pH、電気伝導度の測定、さらに必要に応じて、炭素・硫黄の含有量の分析を行う。堆積物物性としては、キューブ試料（7 cc）の採取とそれを用いた湿潤・乾燥密度、含水量、泥分含有量の測定をそれぞれ実施する。堆積年代の目盛りとして、貝殻と植物片を採取して、その放射性炭素年代測定を行う。放射性炭素年代の測定は、現在では加速器質量分析装置の利用により、年代精度が高いだけでなく、数 mg という微量な貝殻片、植物片の年代測定が可能であり、高密度に測定試料を採取することができる⁷⁾。コア試料の堆積相の記載と解釈は、これらのデータを総合的に判断して行われる。

2.2 堆積相・堆積シーケンス・シーケンス層序学と堆積年代による地史の解説

堆積相は、ある堆積環境を示す単層の集合体であり、粒度などの岩相、堆積構造、化石・生痕などの特徴とその違いに基づいて認定される。堆積システムは互いに密接に関連した堆積環境から構成される一連の堆積場を示し、一般にはいくつかの堆積相の組み合わせで構成される。シーケンス層序学とは、堆積システムとその重なり方に注目し、海水準変動等の外的要因の変化に伴って、どのような堆積システムがどの時期に、どのように発達し、どのように移動・累重するか、を地層の記録から解析する方法である^{8),19),20)}。沖積層では、1回の海水準変動に対応した堆積サイクルを、低海水準期、海進期、高海水準期に区分し、それぞれに対応する堆積システムが設定される⁸⁾。

一つのオールコアから高密度で得られた放射性炭素年代値に基づき、採取試料の標高と年代値を結ぶことで堆積曲線が得られる⁶⁾。図-2において、東京低地付近の7地点のボーリングコアから得た堆積曲線と周辺地域の年代値から作成された相対的海水準変動曲線を示す¹⁵⁾。

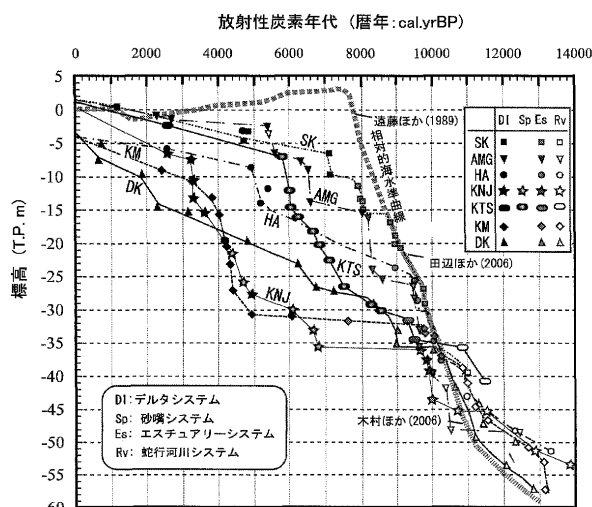


図-2 沖積層の堆積曲線と相対的海水準曲線
データの出典 SK: GS-SK-1¹⁵⁾, AMG: GS-AMG-122²⁾, HA¹⁵⁾, KNJ: GS-KNJ-110¹⁾, KTS: GS-KTS-110¹⁾, KM: GS-KM-1^{15),21)}, DK¹⁵⁾, 相対的海水準曲線^{1),15),23)}

堆積曲線の傾斜から堆積速度を、堆積曲線と相対的海水準曲線との標高差から当時の古水深の情報を得ることができる⁶⁾。堆積年代は、堆積システムを区分する上でも重要な役割を果たす。

2.3 東京低地付近の沖積層の地史

図-3¹⁵⁾は東京低地の中央部（GS-KM-1）と中川低地の南部（GS-SK-1）から得た沖積層の堆積柱状図を示す。同図で、沖積層は、下部から、網状河川、蛇行河川、エスチュアリー、デルタの各堆積システムに細分されている。

網状河川システムは、浅い流路が砂州を間に挟んで網状をなす礫質な河川のシステムであり、河川の上流部から山麓扇状地の末端部で形成される⁸⁾。沖積層のボーリングコアでは、同システムは礫層と砂層とが互層する比較的単調な岩相をなしており（図-3），堆積相としても砂礫相ないし礫・砂互層相として一括されることが多い。植物片などの適当な試料が欠如しているため放射性炭素年代値の情報が得られることはほとんどないが、立川段丘礫層を下刻する開析谷底の直上に重なる礫質河川堆積物なので、海水準が最終氷期頃に海水準が100 m 前後下がっていた約20000～18000年前（以下、年代はす

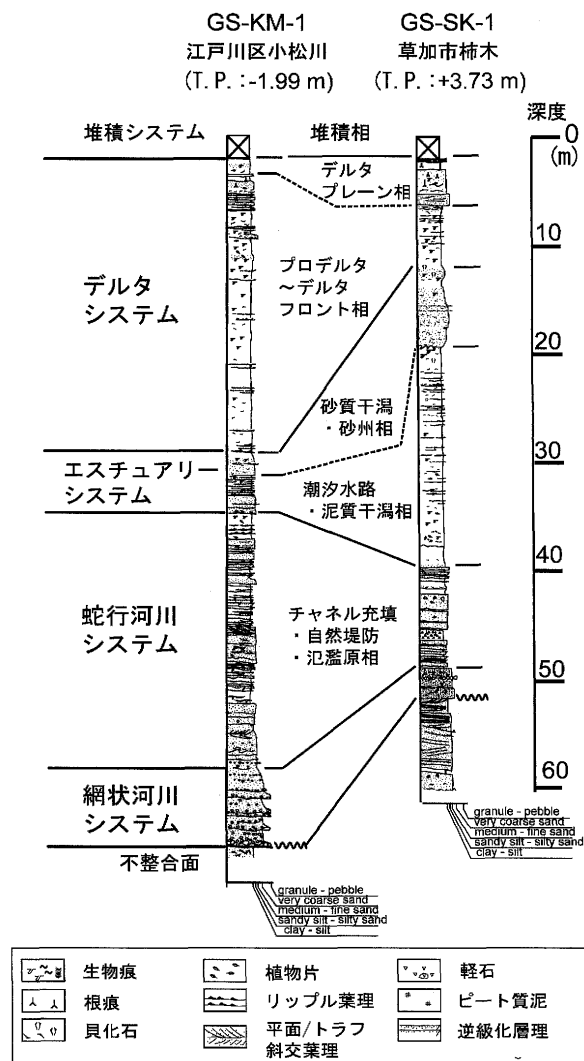


図-3 沖積層の堆積柱状図^{15),17),21)}
柱状図の位置は図-1 参照

論 説

べて暦年)の堆積体(低海水準期堆積体)にあたりと解釈されている²⁾。これは、いわゆる沖積層基底礫層(BG)^{2),13)}に相当する。

蛇行河川システムは、蛇行する河道、それに随伴する自然堤防、その背後に広がる後背湿地などを形成する氾濫原を堆積場とするシステムである⁸⁾。同システムは、典型的には、河道をポイントバーの側方移動により充填したチャンネル充填の中粒砂相、その上位には、自然堤防にあたる砂泥互層相、後背湿地の有機質な泥相が順次重なり、上方細粒化の堆積相組み合わせを示す(図-3)。下位の網状河川システムの上位に整合的に重なる。本システム相当区間の14000~10500年前の堆積曲線は、いずれのコアについても、相対的の海水準曲線の上位、すなわち当時の海水準より標高の高い陸域環境であったことを示している(図-2)。

エスチュアリーシステムは、海の影響が表れる河口域の堆積場にあたり、塩水湿地や泥干潟を示す泥相、潮汐チャンネル充填物や砂干潟・河道砂州にあたる砂相などの堆積相から構成される(図-3)。全体に上方に向かって細粒化し、海の影響が強くなる堆積環境へと移り変わる。蛇行河川システムとエスチュアリーシステムは海水準上昇期の海岸線が次第に内陸に入り込んでいく海進期の堆積体に相当する⁸⁾。エスチュアリーシステム相当区間の10500~7000年前頃の堆積曲線は、始めに海水準曲線に沿って急速な堆積速度で地層が累重し、後に堆積速度が低下するとともに、水深が急速に深くなっていることを示している(図-2)。

エスチュアリーシステムの上位には、高海水準期の堆積体にあたるデルタシステムが重なる。両システムの境界は、最も海が内陸深く広がり、堆積作用が海進から海退に転じた層準を示す最大氾濫面にあたる。この最大氾濫面の層準にあたる約7000年前頃の各堆積曲線は無堆積や極めて遅い堆積速度を示している(図-2)。

デルタシステムは、内湾泥底にあたるプロデルタからデルタフロント、デルタプレーンという次第に上方に粗粒化・浅海化する堆積相から構成される(図-3)⁸⁾。デルタが前進し、堆積場がプロデルタからデルタフロントに変わると、堆積速度が一段と早くなる。上流のSK, AMG地点では、7000年~6500年前頃、中流部のHA地点では5000年前頃、下流部のKMでは4000年前頃にデルタフロントが到達したことを示す堆積曲線の立ち上がり認められる(図-2)。東京低地の北東部のKNJ, KTS地点では、海進期後半から高海水準期にかけて、厚い砂層からなる砂嘴システムが発達している(図-2)¹⁰⁾。

N 値で0~1の軟弱な海成粘性土は、その大半は、エスチュアリーシステムの上部からデルタシステムのプロデルタからデルタフロントの堆積環境にあたる^{15),21)}。

以上のように沖積層を堆積システム・シーケンス層序の見方で捉えることで、海水準変動によってコントロールされた堆積環境とその変遷の詳細を理解することができる。なお、上記に説明した沖積層の堆積システムは、

奥の深い内湾で波浪が弱く潮汐流が卓越している堆積環境の事例である。日本海側の新潟平野のように、外洋に面して波浪の影響が強い堆積環境では、海進期の河川・エスチュアリーシステムに続いて、湾口や海岸線付近にバリアーシステムが形成され、内湾ないしラグーンが外洋から閉ざされる。そして、海退期のデルタシステムと同時期に、海岸線近くでは浜堤列が形成され、順次海側に向かって発達するという浜堤列平野のシステムが形成される⁸⁾。

2.4 ボーリングデータの利用による3次元地質モデルの構築

調査地域について高密度で得られたボーリングデータを地下の地質情報のデータベースとして整備し、適切な方法で N 値や岩相を空間補間することで、沖積層内部の岩相変化を3次的に高精度に復元・表示することができる^{9),21)}。通常、平野部の地質断面図はボーリング柱状図の情報から、岩相や地層境界を対比して作成される。しかし、この場合、作成者の考え方によって内容が左右されることが多い。江藤ほか⁹⁾は、水平に地層が堆積するという沖積層の地質特性を踏まえて、ボーリングデータを用いた空間補間の統計解析の方法を考案した。その概要は次のとおりである。まず、ボーリングデータについて、 N 値は最大50までとし、岩相は粒度に基づいて主に礫、砂、砂泥、泥の4区分、個々の土質と N 値の区間深度は標高1m単位に切り出し整理する等の規格化を行い、モデル計算用のデータベースを作成する。そして、このデータベースを基に、標高1m毎の水平断面内で、 N 値については逆距離加重法によって、岩相については最頻値として、それぞれ、各グリッドの中心点の値として求める(図-4)。

江藤ほか⁹⁾は、東京低地北部地域の沖積層(図-1の範囲a)に適用し、 N 値と岩相の水平50m、垂直1m精度の3次元のグリッドモデルを作成した(図-5, 口絵写真-1)。利用したデータは、産業技術総合研究所の都市地質研究プロジェクトで収集・整備された250m四方に平均1本のボーリングデータ、2175本である。個々のボーリング地点での沖積層の基底深度は別途作成

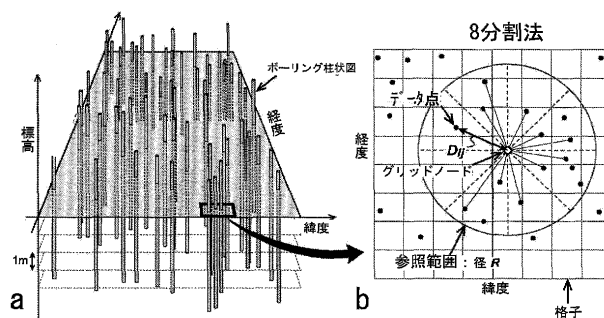


図-4 3次元モデル構築手法の概要⁹⁾

a: ある標高の水平断面内のモデル地域にランダムに分布するボーリングデータを示す。b: 八つに分割された各領域でグリッドノードに最も近いものから2点、最大16点のボーリングデータが計算に用いられる。

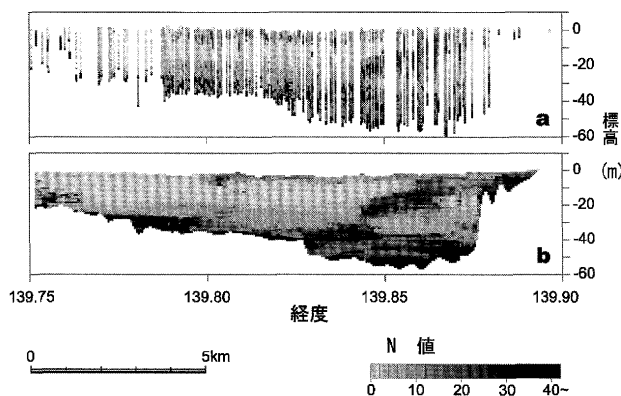


図-5 ボーリング柱状図の N 値断面(a)と N 値の断面図モデル(b)⁹⁾ 断面線の位置は図-1のC-Dにあたる。aに比べて、b断面では N 値の側方変化が鮮明に表現されている。

され、その深度データに基づいて、モデル内の沖積層分布の輪郭が切り出されている。こうして作成された N 値・岩相のグリッドモデルは、堆積システムの空間分布とその側方変化を考察する上で有効である^{9),10)}。例えば、図-5と口絵写真-1において、標高-35m以深の N 値の高い地帯は、蛇行河川システムに相当しており、水平方向に複雑に岩相が変化する堆積環境の特徴が表現されている。一方、-25m以浅、139.85度以西に認められる N 値5以下の均質な厚い泥層は、プロデルタ〜デルタフロントの海成泥層に相当する⁹⁾。同以東には N 値10以上の砂層が卓越するが、これは砂嘴システムにあたる¹⁰⁾。

3. おわりに

地質学的研究と地盤工学的研究が融合されることで堆積環境と土質特性との密接な関係と土質特性発現の機構解明が可能になるものと考えられる。本小論が両分野の学際的研究の発展の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 遠藤邦彦・小杉正人・松下まり子・宮地直道・菱田 量・高野 司：千葉県古流山湾周辺域における完新世の環境変遷史とその意義，第四紀研究，Vol. 28, pp. 61~77.
- 2) 井関弘太郎：「沖積平野」，東京大学出版，145p., 1983.
- 3) 土質工学会：「堆積環境が地盤特性に及ぼす影響に関するシンポジウム」発表論文集，198p., 1995.
- 4) 清水恵助：「沖積層」の土質工学的性質—とくに東京港地区を例として—，地質学論集，No. 7, pp. 251~266, 1972.
- 5) 田中勝法・竹村貴人・木村克己：堆積環境の変遷から見た沖積層の圧密特性，地質学論集，No. 59, pp. 191~204, 2006.
- 6) 増田富士雄：高密度で測定された ^{14}C 年代測定値による完新統のダイナミック地層学，地学雑誌，Vol. 107, pp. 713~727, 1998.

- 7) 中村俊夫・中井信之：放射性炭素年代測定法の基礎—加速器質量分析法に重点を置いて，地質学論集，No. 29, pp. 83~106, 1988.
- 8) 斎藤文紀：シーケンス層序学による沖積層の捉え方，地質と調査，Vol. 98, pp. 103~118, 2003.
- 9) 江藤雅雅子・石原与四郎・田辺 晋・木村克己・中山俊雄：ボーリング柱状図資料を用いた N 値と岩相お3次元分布モデル—東京低地北部における沖積層の例—，地質学雑誌，Vol. 114, pp. 187~199, 2008.
- 10) 田辺 晋・中島 礼・中西利典・石原与四郎・宮地良典・木村克己・中山俊雄・柴田康行：東京都葛飾区における沖積層の堆積相と堆積物物性：奥東京湾口の砂嘴堆積物の時空間分布，地質調査研究報告，Vol. 57, pp. 261~288, 2008.
- 11) 青木 滋・柴崎達雄：海成「沖積層」の層相と細分問題について，第四紀研究，Vol. 5, pp. 13~120, 1966.
- 12) 遠藤邦彦・関本勝久・高野 司・鈴木正章・平井幸弘：関東平野の沖積層，アーバンクボタ，No. 21, pp. 26~43, 1983.
- 13) Kaizuka, S., Naruse, Y. and Matsuda, I.: Recent formations and their basal topography in and around Tokyo Bay, central Japan, *Quaternary Research*, Vol. 8, pp. 32~50, 1977.
- 14) 井内美郎ほか編：沖積層研究の新展開，地質学会論集，No. 59, 212p., 2006.
- 15) 木村克己・石原与四郎・宮地良典・中島 礼・中西利典・中山俊雄・八戸昭一：東京低地から中川低地に分布する沖積層のシーケンス層序，地質学論集，No. 59, pp. 1~18, 2006.
- 16) 木村克己：巻頭言：都市地質研究の展開，地質調査研究報告，Vol. 55, pp. 181~182, 2004.
- 17) 石原与四郎・木村克己・田辺 晋・中島 礼・宮地良典・堀 和明・稲崎富士・八戸昭一：埼玉県草加市柿木地区で掘削された沖積層ボーリングコア (GS-SK-1) の堆積相・堆積物特性と放射性炭素年代，地質調査研究報告，Vol. 55, pp. 183~200, 2004.
- 18) 三浦健一郎・七山 太・大塚一広・杉山雄一・佃 栄吉：地震被害軽減を目的とした浅海底活断層の活動履歴研究(I)—研究手法概説—，地質ニュース，No. 568, pp. 13~28, 2001.
- 19) 保柳康一・松田博貴・山岸宏光：シーケンス層序と水中火山岩類，日本地質学会フィールドジオロジ—刊行委員会編，フィールドジオロジ—4，共立出版，180p., 2006.
- 20) 伊藤 慎：シーケンス層序学的地層観，地質学論集，No. 45, pp. 15~29, 1995.
- 21) 宮地良典・木村克己・石原与四郎・田辺 晋・中島 礼・堀 和明・中山俊雄・斎藤文紀：東京都江戸川区小松川地区で掘削された沖積層ボーリングコア (GS-KM-1) の堆積相・堆積物物性と放射性炭素年代，地質調査研究報告，Vol. 55, pp. 201~219, 2004.
- 22) 田辺 晋・中島 礼・中西利典・木村克己・柴田康行：東京都足立区から採取した沖積層ボーリングコア堆積物 (GS-AMG-1) の堆積相，放射性炭素年代と物性，地質調査研究報告，Vol. 57, pp. 289~307, 2008.
- 23) 田辺 晋・石原園子・中島 礼・宮地良典・木村克己：東京低地中央部における沖積層の中間砂層の形成機構，地質学論集，No. 59, pp. 35~52, 2006.

(原稿受理 2008.12.18)