

東京低地と中川低地の沖積層堆積物で作成した 懸濁液の水素イオン濃度指数及び電気伝導度

内山美恵子¹・原未来也²・竹内美緒³・木村克己^{4,*}

Mieko Uchiyama, Mikiya Hara, Mio Takeuchi and Katsumi Kimura (2011) Electric conductivity and pH profiles of pore water extracted from the latest Pleistocene to Holocene sediments in the Tokyo and the Nakagawa Lowlands, Central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 62 (1/2), p. 85-104, 6 figs, 3 tables.

Abstract: The latest Pleistocene to Holocene incised-valley fills (so called Chuseki-so) are distributed beneath the Tokyo and the Nakagawa Lowlands, central Japan. The Chuseki-so has been divided into the delta system, the estuary system, the meandering river system and the braded river system, in a descending order. This study has two purposes. One is to set up properly the method of chemical analysis of core sediment for evaluating the chemical features of in-situ the chuseki-so. The other is to make clear pH and electric conductivity (EC) of the Chuseki-so and the relationship between these characters and the sedimentary environment.

In the beginning, it was provided to carry out the comparative study of two typical existing techniques, that is, the official method defined by the environmental quality standards for soil declared by the Ministry of the Environment (called OM method) and the soil test build up by the Japanese Geotechnical Society (called JGS method). It turns out that the pH and EC values are influenced by shaking, filtering and drying treatments used in the OM method. The former two was adopted, because they are necessary to analyze the ionic density. On the other hand, the latter was not adopted, and instead, the test samples were treated in the wet condition of the borehole sedimentary cores.

Next, based on these two revised method, we analyzed the pH and EC characteristic of the extracts of the Chuseki-so collected from three borehole cores (GS-MHI-1, GS-KNJ-1 and GS-KM-1) in the Tokyo and the Nakagawa Lowlands, central Japan. The results are following.

1) It turns out that the depth variations of the pH and EC values present the same profiles by two different methods of chemical analysis (the OM and JGS methods), through three different cores; that is, the uppermost low value interval, the upper increasing-value interval, the middle high value interval, the lower decreasing-value interval, and the lowermost low-value interval, in descending order. The uppermost and lowermost low value intervals are characterized by pH 7 and low EC value, while the middle high value interval by alkalescence with pH 9 to 10 and high EC value.

2) The middle high value interval is, a range from above sea level -7m to -34m, correlated to the marine sedimentary environment ranging from the delta system except for the uppermost part (modern recent river sediments) to the upper part of the estuarine system. The uppermost low value interval is a range from above sea level -2m to -8m, and the lowermost low value interval ranges from above sea level -38m to -52m. Both intervals are correlated to the fresh water sedimentary environment of the uppermost part of the delta system and the meandering system. The depth range of the each interval almost reflects that of the sedimentary environments in each borehole cores.

The above-mentioned facts direct the characteristic pH and EC depth variation trend to be an effective index of the paleoenvironment of the Chuseki-so.

Keywords: pH, electric conductivity, extracts, geochemical analysis, drilling core, late Pleistocene to Holocene, Chuseki-so, Tokyo Lowland, Nakagawa Lowland

¹都留文科大学 (Tsuru University, 3-8-1, Tawara, Tsuru, Yamanashi, 402-8555, Japan)

²光技術研究部門 (Photonics Research Institute, AIST. Central 2, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, 305-8567, Japan)

³地圏資源環境研究部門 (Institute for GeoResources and Environment, GSJ, AIST. West, 16-1 Onogawa, Tsukuba, 305-8569, Japan)

⁴地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, GSJ, AIST. Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, 305-8567, Japan)

*Corresponding author: K. KIMURA, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. Email: k.kimura@aist.go.jp

要 旨

沖積層の原位置の化学的特性を得るための懸濁液作成法として、地盤工学会の土質試験法の懸濁液作成法 (JGS法) と、環境省の公定法の検液作成法 (OM法) の両方法を参照して、適切な検液作成法を得るために基礎実験をおこなった。その結果、OM法に規定されているろ過、乾燥、振とうの各処理について、pHとECともに影響を受けることが判明した。本実験では、JGS法についてはOM法のろ過処理を加え、OM法では乾燥処理と酸処理を省くという修正をした上で、両方法による分析実験を行った。分析対象とした沖積層の堆積物試料は、産総研の都市地質プロジェクトで実施された東京低地と中川低地で得られた層序ボーリングコアから採取した。採取した堆積物試料から懸濁液を作成し、そのpHとECを測定した。pHとECの深度方向の変化プロファイルは3本のコアでほぼ共通しており、上位より下位へ、最上部低値安定区間、上部遷値区間、中部高値安定区間、下部遷値区間、最下部低値安定区間の5つの区間に識別される。中性でかつ低EC値を意味する最上部と最下部の両低値安定区間は、pHとECともに同一深度範囲であり、相当する堆積物は淡水成環境の蛇行河川堆積物に限定される。一方、弱アルカリ性、高EC値を意味する中部高値安定区間は、pHに比べてECの同区間が短いがいずれもデルタシステムの海成環境の堆積物に限定されることが判明した。中部高値安定区間のpHは、フィルタリング処理の中で1～1.5低下していることを考慮すると、原位置の同pHはpH9-10である。今回得られた沖積層の海成堆積物試料の懸濁水のpHとEC、主要イオン濃度は海水と比較すると、イオン濃度が桁違いに低く、イオン組成とも違っていることから、堆積後現時点までに顕著なイオンの溶脱・移動や化学反応があったものと推定される。しかし、今回得た沖積層のpHとECの深度変化の特徴的なプロファイルは、淡水成と海成の堆積環境を識別する指標として利用できるものと期待される。

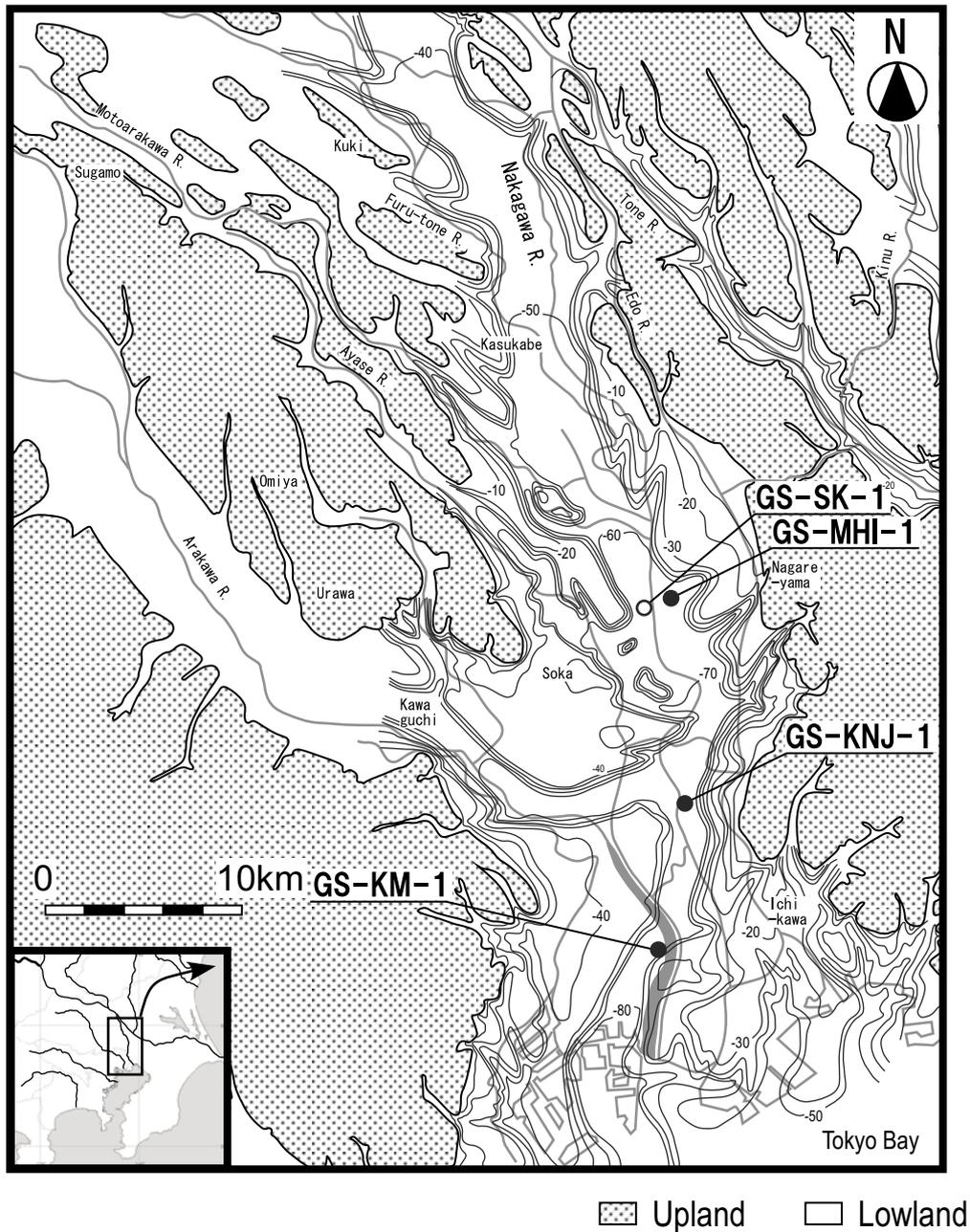
1. はじめに

東京湾岸からそれに続く河川沿いの低地部には、最終氷期最寒冷期頃までに形成された開析谷を埋積する厚い沖積層が分布している。海岸平野において、広大な平坦地の地盤をなす沖積層は人類の活動に密接した地層であることから、その地盤環境を把握することは、防災対策や都市環境整備など社会基盤整備のうえで重要である。

堆積環境の違いにより生じる第四紀粘土層の特徴を地球化学的に研究した例は、市原 (1960) 及び市原・市原 (1971) に詳しい。市原 (1960) は、露頭より得られた大阪層群の海成粘土と淡水成粘土、ボーリングコアより得られた沖積層海成粘土及び大阪湾の底泥試料の化学分

析結果を比較した。その結果、酸化状態の海成粘土では粘土層中に多量に含まれる硫化物が酸化して硫酸が生成されて堆積物の水素イオン濃度指数 (以下、pH) の値が下がること、この硫酸が粘土層中の塩基を溶脱することを示した。また、市原・市原 (1971) は、大阪層群の海成粘土及び淡水成粘土に含まれるリン・イオンとそれらの化合物について整理し、堆積物中のリン酸塩と硫化物の生成機構や、それらの風化による堆積物に与える影響を論じている。これらの論文は、以降の第四紀海成粘土を用いた地球化学的研究の礎となっている。横山・佐藤 (1987) は酸化した海成粘土に硫酸塩が生成されることに着目し、ボーリング調査で得られた海成及び淡水成の粘土を乾燥して懸濁液を作成し、懸濁液の電気伝導度 (electric conductivity; 以下、EC) を測定した。その結果、ECの値が硫酸イオン濃度と正の相関があることを示し、EC値が0.4mS/cm以下のものは淡水成、0.4～1.2mS/cmのものは汽水成、1.2mS/cm以上のものは海水成、とEC値に基づいた古環境の推定を試みた。同様の手法により古環境を推定する研究は、茨城県筑波台地のボーリングコアと露頭採取試料の例 (小荒井ほか, 1990)、東京低地の沖積層ボーリングコアの例 (小荒井ほか, 1992)、大阪湾関西国際空港のボーリングコアの例 (佐藤・横山, 1992)、愛知県知立～刈谷地域のボーリングコアの例 (森山ほか, 1996)、三重県雲出川下流低地のハンドオーガー採取試料の例 (川瀬, 2002)、濃尾平野南部地域のボーリングコアの例 (内園・森, 2004; 内園, 2007) などがある。これらの研究はいずれも炉乾燥試料 (110℃, 48時間) を用い、珪藻化石群集の解析結果と対比することにより、懸濁液のpHとECないしECだけの値を用いて簡便に地層堆積環境の推定が可能であるとしている。一方、安井ほか (2004) は、新潟平野の白根地域と加治川地域の沖積層のボーリングコアについて、炉乾燥試料で作成した懸濁液のpHとECの値を、珪藻化石群集解析とC/S比とで推定された堆積環境との比較に基づき、沖積層におけるpHとECの関係は堆積物中の塩分濃度や底層の酸化・還元状態をある程度反映しており、ECのみによって淡水・汽水・海水という堆積環境は判断できないとしている。

横山・佐藤 (1987) をはじめとする一連の研究では、試料を高温で炉乾燥させ、十分に酸化させた場合、海成と非海成でpHとECに違いが認められることを示した。しかし、一方、土壤汚染対策における環境評価、地盤の工学的評価においては、地盤の原位置における化学的特性が対象となっている。海岸平野における沖積層の多くが地下に埋没しており、堆積物は還元的状態にある。原位置の化学的特性は堆積物の堆積環境とどのような関係があり、果たして、堆積環境の指標になりうるかどうかを検討することは、土壤汚染対策の環境評価や地盤の工学的評価にも重要であると考えられる。しかし、土壤汚



第1図 分析用試料を採取した層序ボーリングコアの掘削地点。背景図は台地と低地の地形区分及び埋没谷の基底深度分布を示す。埋没谷基底深度は遠藤ほか(1988)を引用。なお、白丸のボーリングコアの分析値は参考データとした。

Fig. 1 Locality of the GS-SK-1, GS-MHI-1, GS-KNJ-1 and GS-KM-1 core sites and distribution of an incised valley under the Tokyo and the Nakagawa Lowlands (Endo *et al.*, 1988).

染対策における環境評価に用いられる環境省の公定法の溶出試験と地盤工学会の土質試験法による懸濁液作成法とは違った処理や測定条件があるため、原位置の化学特性を求め、評価するためには両方法の比較・検討が必要である。

本研究では、沖積層堆積物の原位置における化学的特性と堆積環境との関係を検討するために、まず、環境省

の公定法の溶出試験と地盤工学会の土質試験法による懸濁液作成法を比較・検討し、乾燥・振とう・ろ過などの手法がpHとECがどのような影響を与えるかについて実験を行って、適切な分析処理の内容を整理して両方法の一部を修正した。次にこの修正した両方法を使って、東京低地と中川低地で得られ、既に堆積システムや堆積環境が詳細に解明された沖積層の層序ボーリングコア試料

第1表 分析試料に用いたボーリングコアの掘削位置と仕様

Table 1 Locality data and specification of borehole cores used for chemical analysis of this study.

ボーリング名	掘削位置住所	緯度・経度 (世界測地系)	孔口標高 (T. P. m)	掘進長 (m)	コア径 (mm)	泥水材料	掘削年・月
GS-MHI-1	埼玉県三郷市彦成 3-14-4	N35° 51' 41.6" E139° 51' 05.2"	0.425	55.30	90	イーゾードリル	2004年7月
GS-SK-1	埼玉県草加市柿木 162	N35° 51' 21.1" E139° 50' 18.6"	3.73	60.00	86	ベントナイト	2003年3月
GS-KNJ-1	東京都葛飾区新宿 5	N35° 45' 49.3" E139° 51' 38.8"	0.425	70.00	86	イーゾードリル	2004年1月
GS-KM-1A	東京都江東区小松川 2-3	N35° 41' 33.4" E139° 51' 09.1"	-1.99	67.23	66 (triple;75)	ベントナイト	2003年3月
GS-KM-1C	同上	同上	-1.99	65.90	75	イーゾードリル	2003年10月

3本について、堆積物の懸濁液のpHとECを分析し、その深度変化の特徴を明らかにし、堆積環境との関係を考察した。以下、本研究の成果を記述する。

2. 調査地域の地質の概要

本研究の調査対象地域は、更新統からなる下総台地と武蔵野台地に挟まれ、東京湾に面した東京低地と、その北方に位置する中川沿いの中川低地である。本地域地下に分布する沖積層の層序は、約1万年前頃、新ドリラス期の一時的な海水準低下に伴って形成されたと考えられる不整合を境に、下位より淡水～汽水成の砂泥互層からなる七号地層と、海成粘土層を主体とする有楽町層とに2分され(青木・柴崎, 1966; 青木, 1969; 東京都土木技術研究所, 1969), 七号地層, 有楽町層の基底にはそれぞれ基底礫層(Basal Gravel: BG), 完新統基底礫層(Holocene Basal Gravel: HBG)が認定されていた(Kaizuka *et al.* 1977; Endo *et al.*, 1982; 遠藤ほか, 1983)。以来、この層序区分は最近まで踏襲されていた(東京都港湾局, 2001; 石綿, 2004)。しかし2002年以降、産業技術総合研究所の都市地質プロジェクトにおいて(木村, 2004), 層序ボーリング調査が実施され(第1図), シーケンス層序学に基づいた堆積相解析や貝化石・珪藻化石・花粉化石による古環境解析, 高密度の炭素同位体年代測定値などに基づき, 沖積層の形成過程についてこれまでと異なった提案がなされている(石原ほか, 2004; 宮地ほか, 2004; 中島ほか, 2004; 木村ほか, 2006; 中島ほか, 2006; 田辺ほか, 2006; 中西ほか, 2007; 田辺ほか, 2007)。これらの研究によると, 本地域の沖積層は海進・海退の一つのサイクルで形成された一連の堆積物であり, 下位より低海水準期堆積体の網状河川システム, 海進期堆積体の蛇行河川システム, エスチュアリーシステム, 砂嘴システム, 高海水準期堆積体のデルタシステムの5つの堆積システムに区分される。デルタシステム

はプロデルタからデルタフロント, デルタプレーンに細分される。内陸ではデルタプレーンは現世の氾濫原堆積物で構成される。これらの堆積システムのうち, 内湾環境下の海成堆積物は, エスチュアリーシステムの最上部, 砂嘴システム, その上位に重なる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物に相当する。一方, 網状河川システムと蛇行河川システム, そして最上部の現世の氾濫原堆積物は淡水成環境に相当する。エスチュアリーシステムの大半と最上部の氾濫原堆積物を除くデルタプレーン堆積物は汽水成環境にあたる。従来不整合とされていた七号地層と有楽町層との地層境界は, 海進期不連続面である内湾ラビーンメント面にあたりと解釈されている(木村ほか, 2006)。

本研究では堆積環境と堆積物の地球化学的特性との関係を考察するため, 地層の表記は堆積システム区分に基づく。

3. ボーリング調査とコア試料の概要

3.1 ボーリング調査

分析に用いたボーリングコアは, 東京低地のGS-KM-1(宮地ほか, 2004), 東京低地と中川低地の境界部付近のGS-KNJ-1(田辺ほか, 2006), 中川低地のGS-MHI-1(中西ほか, 2010)の3地点のボーリング調査で採取されたものである。各ボーリング調査の地点を第1図に, 仕様を第1表に示す。

ボーリング調査で用いられる泥水材料では, ベントナイトが一般に利用されている。しかし, その懸濁水のpHは10前後であり, イオン吸着性も顕著であることが知られている。そのため, 本研究で利用したボーリングコアの掘削では, 東京低地のGS-KM-1の2本のコアのうちGS-KM-1Aを除いた他では, 高分子ポリマーのイーゾードリルが用いられた(第1表)。なお, GS-KM-1Aの掘削ではベントナイトを泥水材料に用いたものである。

が、ベントナイトの影響の概要を知るために分析対象として加えたものである。

3.2 トレーサー試験

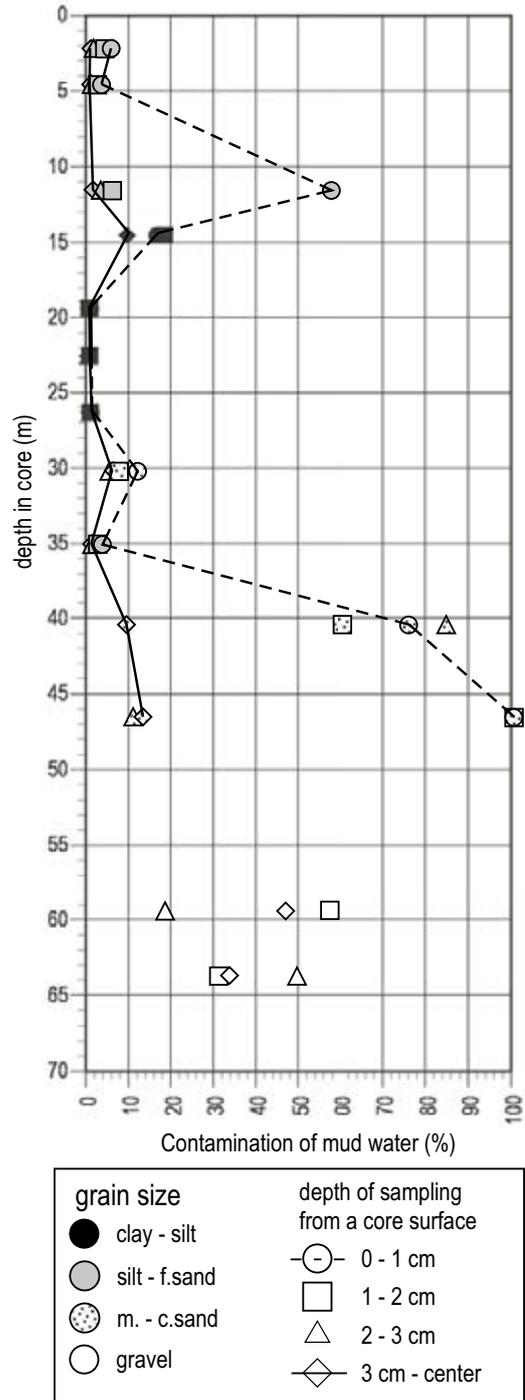
コア試料への泥水による汚染の有無を確認するために、GS-KM-1C (径75mm) においてトレーサー試験を行った。トレーサーにはナフチオ酸ナトリウム (C₁₀H₈NNaO₃S・4H₂O, Wako) を使用した。試料は、主要な堆積相から13層準選定し、コア表面を0として0～1cm, 1～2cm, 2～3cm, 3cm～中心までと同心円状に採取した。分析に用いる検液は、湿潤試料と同重量の超純水とをよく懸濁し、遠心分離後にφ0.2μmのメンブランフィルターによるろ過を経て作成し、その分析は、蛍光光度計F-2500 (HITACHI) を用いて励起波長320nm, 蛍光波長420nmの条件で実施した。測定値は、泥水に含まれるトレーサー濃度を100%として、間隙水に含まれるトレーサー濃度から泥水の混入割合を計算して、泥水による汚染率として表現した。その結果を第2図に示す。これらのうち、深度59.0m以深の砂礫層ではコアパックを使用して試料を採取しており、特に礫層では砂質部は流失している部分が多いので、得られた数値はシルト・砂試料のデータと同格に扱うことはできない。ここでは参考値として値を示した。

トレーサー試験の結果、粘土～細粒砂の試料では、コア中心部付近の泥水混入率は深度14.45mを除いてほとんど0%に近いのに対して、中～粗粒砂では5～10%前後泥水が混入している結果が得られた。またコア表面付近では、粘土～シルトは深度14.45mが16%、その他は1%、シルト～細粒砂は深度11.6mが57%、その他が3～5%、中粒～粗粒砂は深度30.25mが11%、その他が75～100%という結果が得られた。これらより全体の傾向として、泥水混入率は堆積物の粒度が細粒なほど、またコア中央部の方が低いということが確認された。

以上より、地球化学分析を行う際に用いる試料は、採取対象深度区間内において、できるだけ細粒で均質な区間を選択した。しかし、区間内がすべて砂である場合にはこの限りではないことをお断りする。また、実際の分析の際にはコア中心付近を試料として用いることとし、少なくともコア表面1cmの部分は使用しないこととした。

3.3 泥水

ボーリング調査において泥水に混ぜる材料は、モンモリロナイトを主原料とするベントナイトがよく用いられる。しかし、ベントナイトを溶かした泥水はpH10、イオンの吸着性の高さなど、コア堆積物の化学特性に影響が及ぼす恐れが高い。本研究でも、初期のボーリング調査では泥水材料にベントナイトを用いていた。その際に採取したコアは、今回対象としたコア試料5本のうち、



第2図 トレーサー濃度測定に基づくコア堆積物の泥水汚染度評価。ボーリングコアはGS-KM-1Cを利用。コア表面からの採取深度毎の堆積物試料について、泥水に含まれるトレーサー濃度を100%として泥水による汚染度を表示した。

Fig. 2 Ratio of the contamination with drilling water in a core sample. The contamination ratio is evaluated by using the tracer concentration within the drilling water. The tracer concentration is set to be 100%.

GS-SK-1及びGS-KM-1Aの2本である。実際、GS-KM-1AのpH、EC値では、深度40m、45m、52m付近の透水性の高い砂質堆積物において、周囲の細粒堆積物に比較して、有意に高い値を示すことが認められた(第5.2図参照)。そのため、以後では、ベントナイトの代わりに、高分子ポリマーのイーゾードリルを利用した。

4. 分析用試料の採取・保管・処理

地下における堆積物の賦存状況は、地下水水面下の飽和帯では、堆積物は粒子間を間隙水で満たされた湿潤状態で存在する。帯水層になりうる砂層や礫層など、透水性が高く地下水が流動しやすい地層では、地下水を通じて溶存している酸素が堆積物中に供給されることもあるが、海成粘土層など透水性の低い堆積物では、酸素はほとんど供給されず還元的環境にある。原位置の堆積物の状態をできるだけ保存した状態で分析することを目的として、以下のとおり分析用試料を採取・処理した。

ボーリングコア(約1m/本)を半裁した直後に、半裁した片方のコアから分析用試料として、原則として1m、3mなどの奇数メートル区間は10cm長で、2m、4mなどの偶数メートル区間は液体クロマトグラフィー分析やその他の地球化学的分析用の試料としても利用するため、20cm長を確保した。その部位としては、汚染を排除する目的でコアの上下端に近い部分を避け、可能な限り岩相が均一で細粒な部分を選択した。

採取部位の選択後、pH・EC測定用試料として、GS-MHI-1以外のコアでは、コア作業場にてコアの芯付近を葉サジでえぐってサンプル袋に詰めた上で、冷蔵保存した。原則、採取後1両日中に検液作成・pH・EC測定を行った。

pH・EC測定用試料を採取した後、残った部位のコア堆積物は、半裁形状のまま丸ごと塩素ガスを含まないラップで包み、厚手のガスバリアー袋(エスカルフイルム、三菱ガス化学製)に脱酸素剤(エージレス、三菱ガス化学製)を同封し、真空シール処理した上で、4℃で冷蔵保管した。

GS-MHI-1ではボーリングコア作業終了後に、この真空・冷蔵保管したコア試料から試料を採取し、検液作成・pH・EC測定の処理を実施した。

5. 懸濁液・検液作成条件の検討

本研究では、堆積物試料に水を加えて作成した懸濁液を用いて実験を行った。懸濁液の作成方法で公に標準化されているものには、地盤工学会が土質試験法の一つとして定めた土懸濁液の作成法(地盤工学会基準JGS0211-2000及びJGS0212-2000;以下、JGS法と略す)と、土壤汚染の有無を評価するための公定法における検

液作成法(平成3年8月23日環境庁告示第46号;以下、OM法と略す)とがある。JGS法とOM法を比較すると大きな違いがある。前者は地盤環境の状況把握を目的にpHとECを測定するための懸濁液作成手法であり簡便であるが、イオン濃度の測定には別途ろ過処理が必要となる。後者は土壤汚染評価を行うために土試料からイオンを溶出するための振とうや酸処理を含み、自然の地盤環境条件下ではなくイオンが溶出しやすい条件を設定している。そのため、地盤環境の状況把握に利用するためには、その条件の影響を考慮しなければならない。本項では、両法の条件の違いを実際のボーリングコアの堆積物試料を使った実験により比較・検討し、本研究に適した分析法を提示する。

それぞれの検液作成方法は以下のように規定されている。

・JGS法

以下の説明は、地盤工学会基準JGS0211-2000及びJGS0212-2000に基づく。

①試料は乱した土の試料調製に従い、非乾燥法によって試料を準備する。②試料の含水比をあらかじめ測定しておく。③粒径10mm以上の土粒子をピンセットで取り除く。④試料の最大粒径が2mm以下の場合、炉乾燥換算質量として30gを1回分の目安(使用する試料の目安は粒径によりそれぞれ示されている)とし、2回分の試料を準備する。⑤試料をピーカーに入れ、試料の乾燥質量に対する水(試料中の水を含む)の質量比が5になるように水(蒸留水またはイオン交換水)を加える。質量比を5にしても懸濁液の状態にならない場合は、更に水を加える。⑥試料を攪拌棒で懸濁させ、30分以上、3時間以内静置したものを試料液とする。

・OM法

平成3年8月23日環境庁告示第46号の「土壤の汚染に係る環境基準について」の付表において、以下のように定められている。

①採取した土壌はガラス製容器又は測定の対象とする物質が吸着しない容器に収める。試験は土壌採取後直ちに行う。試験を直ちに行えない場合には、暗所に保存し、できるだけ速やかに試験を行う。②採取した土壌を風乾し、中小礫、木片等を除き、土塊、団粒を粗砕した後、非金属製の2mmの目のふるいを通過させて得た土壌を十分混合する。③試料(単位g)と溶媒(純水に塩酸を加え、水素イオン濃度指数が5.8以上6.3以下となるようにしたもの)(単位ml)とを重量体積比10%の割合で混合し、かつ、その混合液が500ml以上となるようにする。④調製した試料液を常温(おおむね20℃)常圧(おおむね1気圧)で振とう機(あらかじめ振とう回数を毎分約200回に、振とう幅を4cm以上5cm以下に調整したもの)を用いて、6時間連続して振とうする。⑤①から④の操作を行って得られた試料液を10分から30分程度静置後、

毎分約3,000回転で20分間遠心分離した後の上澄み液をφ0.45μmのメンブランフィルターでろ過してろ液を取り、定量に必要な量を正確に計り取って、これを検液とする。

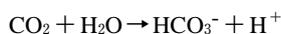
国内の規準となる両方法の検液作成における主な実験条件の違いとして、検液作成時の固相分離作業の有無、懸濁液作成における振とう作業の有無、採取試料の乾燥作業の有無をあげることができる。本研究におけるコア堆積物の検液作成方法を定める上で、この3つの異なる実験条件について、測定値への影響を評価する実験を行った。そしてその実験結果に基づいて検液作成方法を決定した。以下にその基礎実験の内容と検液作成条件について記述する。なお、第5.1と5.2項の実験には湿潤試料を用いた。

5.1 固相の分離

JGS法では検液として懸濁液を使用すると規定されている。しかし、イオン濃度などの水質を測定するには、固相を形成している微粒子は除去する必要がある。固相の分離作業による値の差異を把握するため、分離前後のpH及びEC値の測定値を比較した（第3図）。溶液Aが分離前の懸濁液、溶液Bが分離後の溶液である。試料はGS-KM-1C試料を用いた。

pHとECの深度変化は、溶液A・B共に同様の傾向を示す。しかし、pHの値は溶液Bの方が全体的に0.3～1程度酸性側に低くなっている。一方、ECについては、両液で値の差は小さく、深度17～28mにおいて溶液Bの方が最大2mS/cm高い以外は、他の深度区間では両溶液の値はほぼ同じである。

固相を分離する際の遠心分離及びろ過作業は、EC値に差がないことから溶存イオンの総量には影響しないと考えられる。しかし、pHはろ過・遠心分離した溶液Bの方がどの深度でも全体的に0.3～1程度酸性側に寄っていることから、何らかの化学反応は起こっていると考えられる。大気中での作業により溶液中で影響を受けやすい物質は、一般的に炭酸ガスがあげられる。自然状態の地下水では、遊離炭酸は大部分がCO₂の状態のまま水に溶解し、一部が分子状のH₂CO₃として、またそのごく一部が解離してHCO₃⁻イオンとH⁺イオンとして存在している（日本地下水学会、2000）。しかし、本研究ではメンブランフィルターでろ過するために真空ポンプでひいている。その際、大気中のCO₂ガスが溶解し、



の反応が促進されたことにより水素イオンが生成され、pHが低下した可能性が考えられる。

ろ過作業は水質を測定する際、回避できない作業である。ろ過によりpHの値は低くなるが、プロファイルの

変化傾向は同じであることから、本研究ではデータの質を揃えるために、JGS法もOM法と同様にろ過したものを検液とすることとした。

5.2 振とう時間

OM法に定められた振とう器による振とうは、溶質と溶媒に物理的な力を加えることによって反応を促進させることを意味する。ここでは、OM法における振とう時間の長短による堆積物からの化学物質溶出量の変化を評価する目的で、GS-KM-1C試料を用いて、振とう時間を1時間、6時間、24時間と変化させた場合のpH及びEC値の変化を比較した（第3図）。

ECに関しては、振とう時間の長短に関わらず、鉛直変化はすべて同じ傾向を示すが、その値は、振とう時間が長いほど大きくなる傾向があり、特に値の大きい深度5～35mにおいてはその傾向が明瞭に表れている。pHに関しては、振とう時間の長短による系統的な変化はあまり認められないが、振とう時間が最長のときのpHについては、EC値において明瞭な違いが認められた弱アルカリ性を示す深度10～30m区間において、他の振とう時間のpHに比べて低くなる傾向が認められる（第3図）。すなわち、振とう時間により、溶存イオンが増加し、弱アルカリ性であった場合、pHは低下する傾向があると判断できる。この結果は、前処理に振とう作業が加わらないJGS法（B液）と振とう作業を行うOM法のEC値との比較においても、高EC値の深度区間では全体的にOM法でEC値が高く、pHも若干低い値を示すことから支持される。

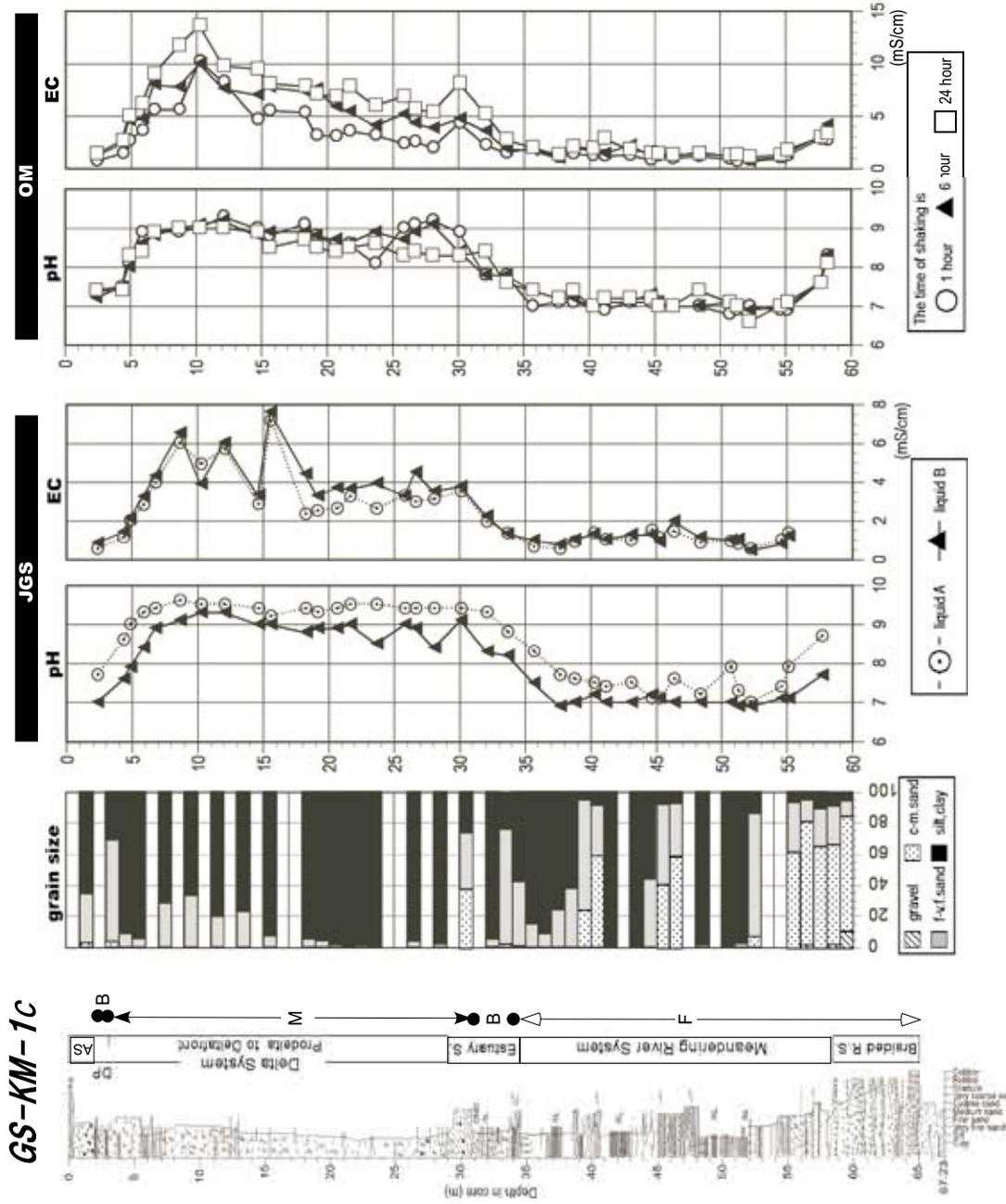
したがって、振とう時間が長いほど溶存イオンの増加やpHの低下の影響は大きくなると考えられるが、振とうする限りその影響は避けられない。本報告では、OM法で記された6時間の振とう時間を採用するが、OM法の値とJGS法の値を比較する際には、振とうによる影響を考慮するものとする。

5.3 試料の乾燥

OM法では試料を風乾するものとされているが、その内容は規定されていない。そこで、検液を作成する試料の乾湿による差がどの程度検液に影響するのかを把握する目的でGS-KNJ-1コアの試料で実験を行った（第4図）。

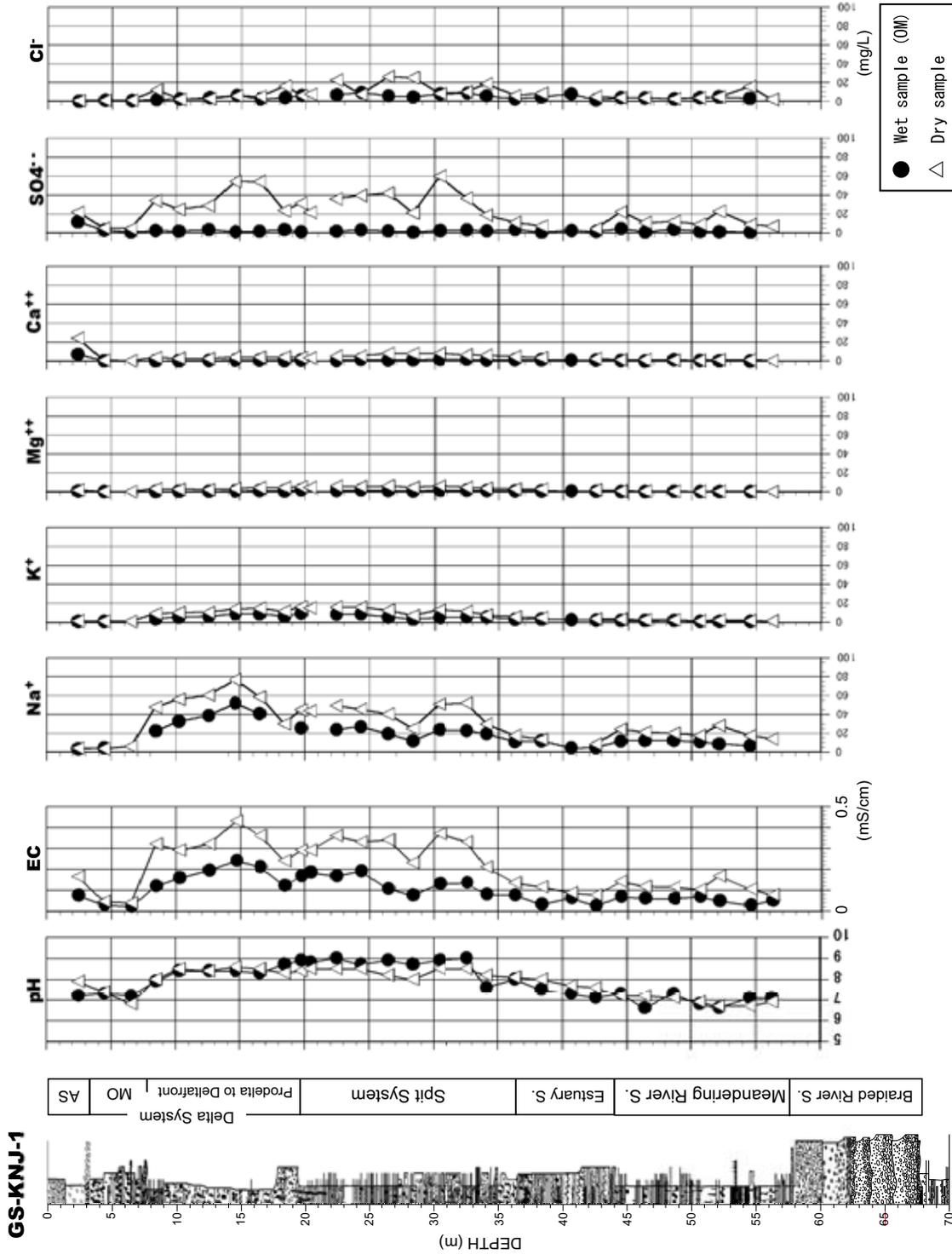
湿潤試料はボーリングコアより試料採取後速やかに処理したものを用いて、OM法により検液を作成した。乾燥試料については、湿潤試料の検液作成で用いた試料の残りを利用して、それを蒸発皿で2日間風乾した。その後、サンプル瓶に入れてデシケーター内で約1年間保管後、OM法により検液を作成した。

本実験ではpHとECを測定後、イオンクロマトグラフィ（DIONEX, IC25）にて検液中の主要イオン濃度を測定した（第4図）。ただし、OM法は振とう作業によ



第3図 懸濁液の処理方法の違いが測定値に与える影響を評価する実験結果。JGSとOMは分析方法を示す。溶液Aは懸濁液をろ過しない検液、溶液Bはろ過した検液を示す。ボーリングコアはGS-KM-1C。地質柱状図と堆積システム区分は田辺ほか(2006)を引用。AS:人工土、DP:デルタプレーン、B、M、Fの説明は第5.1図参照。

Fig. 3 Assessment experiments as for the influence that difference of processing methods of filtration and shaking time gives pH and EC values of sediment extract from GS-KM-1C core. Extract A : a sample without filtration. Extract B: a filtrated sample. Geological column and sedimentary units are after Tanabe *et al.* (2006). AS: Artificial soil, DP: Deltaplain



第4図 乾燥試料と湿潤試料懸濁液のpH、EC及びイオン濃度。ボーリングコアはGS-KNJ-1。懸濁液はOM法により作成。EC値は乾燥試料と湿潤試料間の差を示すために、混合液の希釈率で補正せずに、混合液の希釈率で表示している。地質柱状図と堆積システム区分は田辺ほか(2007)を引用。AS:人工土、MO:現世の氾濫原堆積物

Fig. 4 Values of pH, EC and ion concentration from extract of dry and wet sediment. The sediment is taken from the GS-KNJ-1 core. Geological column and sedimentary facies are after Tanabe *et al.* (2007). AS: Artificial soil, MO: Modern river sediment

り検液と空気とを攪拌させるため、主要イオンのうち HCO_3^- イオンはデータ解釈上意味をなさないと判断し、本試料での測定は行わなかった。測定結果は補正を行わず、両液ともに測定値で示した。

pHの値は乾湿両試料ともにあまり差がなく、低い値でpH7、高い値はpH8～9のアルカリ性を示す。しかし、ECの値はどの層準でも乾燥試料の方が高い値を示し、特に、深度8～35mにおいて湿潤試料が0.1～0.2mS/cmであるのに対して乾燥試料では0.2～0.4mS/cmとほぼ2倍の値を示す。検液に含まれるイオン成分に関しては、湿潤試料で高い濃度を示すのはNaイオンのみであり、ECとNaイオンのプロファイル形態がほぼ同じであることから、EC値の増減はNaイオンが支配していることが推定される。しかし乾燥試料についてはNaイオンの濃度も1.5～2.5倍程度高くなっているが、それ以上に SO_4^{2-} イオンが突出して高くなっている。こうしたイオン濃度が高い深度8～35mの区間は、砂嘴縁辺堆積物（エスチュアリーシステム）からプロデルタ～デルタフロント堆積物（デルタシステム）の海成環境（田辺ほか、2007）にする。この海成環境の深度区間で、 SO_4^{2-} イオンについて乾湿両試料で明瞭な濃度の違いが認められることから判断すると、海成の堆積物中に特徴的に含まれることが知られているパイライト態イオウ（ FeS_2 ）が風乾することにより酸化されて SO_4^{2-} イオンとして溶出する（久馬、1986）ことに起因するものと考えられる。パイライトが酸化されて SO_4^{2-} イオンが生成する場合、同時にHイオンも生成するためpHも下がる。第4図において、pHは、深度18～33mで乾燥試料の値が湿潤試料の値に比べ0.5～1程度低い値を示すことも、この区間は SO_4^{2-} イオンが多い深度と符号する。

つぎに、乾燥試料において増加した各イオンのEC値を計算することで、EC値の増減とイオン濃度の増減との関係を定量的に評価する（第2表）。第2表の乾燥－湿潤総イオンECは乾燥試料において増加したNa・K・ NH_4^+ ・Mg・Ca・Cl・ NO_3^- ・ SO_4^{2-} の各イオン濃度から計算で求めたECの合計値を示す。各イオンの当量伝導度は半谷・小倉（1985）に示される値を、下記（1）の式に基づいて25℃の場合に換算した値を用いた。

$$\lambda_t = \lambda_{18} \{1 + 0.022(t - 18)\} \quad (1)$$

ただし、 λ ；当量伝導度、t；温度

乾燥－湿潤総イオンECが増加分の実測値ECに占める割合をみると、一部100%を超過し、50%前後にしかない試料もあるが、多くは70～90%程度を示す。したがって、乾燥試料において増加したEC値の大半は検液中のイオンの増加によるものとみなせる。その中でも、特にEC値が大きく増加している深度8.4～34.05m区間では、Naイオンが17.5～38.7%、 SO_4^{2-} イオンが21.0～57.3%を占め、この2種類のイオンがEC値の変化に大き

く寄与していることがわかる。すなわち、第4図のイオン濃度とEC値の深度変化から考察したことは、このイオン濃度から求めたECの計算値からも裏付けられたと考えられる。

以上の結果は、化学反応が乾燥試料作成過程で生じた酸化により促進されていることを示す。とりわけ、海成環境の堆積物においては、含まれるパイライト態イオウからの SO_4^{2-} イオンの溶出のためその影響が著しいことが理解できる。したがって、自然状態の地下環境を検討するには試料の乾燥処理は不適切であると考えられる。

6. 検液作成手順

以上の基礎実験をふまえて、本研究では自然状態の地下環境を保存した湿潤試料を用いることとし、原則としてJGS法は固相分離した溶液を、OM法は6時間振とうして固相分離した溶液を検液とすることとした。

6.1 検液の作成

JGS法とOH法ともに試料の含水比は、あらかじめ、つぎの手順で求めておく。すなわち、湿潤試料について、その質量を電子天秤にて測定し、その後、乾燥器内にて60℃で2日間乾燥する。そして、デシケータ内で放冷した後で再度質量を測定し、両測定質量の差の湿潤試料質量に対する割合を求めた。各測定試料の含水比を第3表に示す。貝化石や植物化石、及び粒径10mm以上の礫は、あらかじめピンセットで除去した。

6.1.1 JGS法の修正

検液の作成は、原則として第5節に示した地盤工学会が規定する方法に準拠したが、作業上の問題で一部変更した。変更した部分は、試料の量と遠心分離及びろ過を行った点である。なお、修正後のJGS法を修正JGS法と呼ぶこととする。

本研究では同じコア試料を用いて複数の実験を行うため、一つの実験で利用できる試料の量に限りがある。したがって、コア径と実験メニューに応じて、GS-SK-1は10g程度、GS-KNJ-1、GS-KTS-1、GS-KM-1A・Cは6g程度、GS-MHI-1は30g程度を使用した。

また、前述のように、OM法と条件を揃えることと、検液を水質分析に供することを目的として、JGS法の①～⑥の作業に続けて、次の⑦と⑧の作業を加えた。

⑦では、⑥の作業で得た試料液を遠沈管に移し、砂試料は3000rpmで20分間、シルト・粘土試料は5000rpmで15分間遠心分離器にかける。そして、⑧として、その上澄み液を $\phi 0.45\mu\text{m}$ のメンブランフィルターで吸引ろ過し、溶液のみ分離する。この作業で得た溶液を検液とした。

ここで、⑦における3000rpmで20分間遠心分離、⑧

東京低地と中川低地の沖積層のpH・ECプロファイル（内山ほか）

第2表 乾燥試料と湿潤試料で作成した検液のEC値の差。*1：乾燥試料と湿潤試料間のEC測定値の差。*2：乾燥試料と湿潤試料間のNaとSO₄イオンの濃度差から計算で求めたEC値。カッコ内は各イオンにおける当量伝導度。*3：乾燥試料と湿潤試料間のNa・K・NH₄・Mg・Ca・Cl・NO₃・SO₄イオン濃度差から計算で求めた総イオンEC値。*2と*3の割合は*1の測定EC値の差に占める*2と*3のそれぞれ計算で求めたEC値の割合。

Table 2 Difference of EC and ion concentration between extract of dry and wet sediment. *1 : EC value. *2: EC value obtained by calculating from density difference of Na and SO₄ ion. Parenthetic numerals are equivalent ionic conductivity of each ion. *3: Total value of EC obtained by calculating from density difference of Na, K, NH₄, Mg, Ca, Cl, NO₃ and SO₄ ions.

上端深度 (m)	*1 乾燥-湿潤 EC (mS/cm)	*2 乾燥-湿潤 NaイオンEC (50.2 μS/me)		*2 乾燥-湿潤 SO ₄ イオンEC (78.8 μS/me)		*3 乾燥-湿潤 総イオン EC	
		mS/cm	割合 (%)	mS/cm	割合 (%)	mS/cm	割合 (%)
2.4	0.09	0.002	2.1	0.017	18.5	0.077	86.0
4.4	0.016	-0.02	-10.0	0.004	25.2	0.010	63.7
8.4	0.201	0.055	27.3	0.052	25.8	0.162	80.4
10.2	0.132	0.051	38.7	0.038	28.7	0.105	79.7
12.5	0.127	0.047	37.3	0.041	32.7	0.107	84.2
14.62	0.19	0.054	28.6	0.087	46.0	0.167	87.9
16.5	0.15	0.039	25.9	0.086	57.3	0.163	108.5
18.4	0.119	0.027	22.7	0.033	27.8	0.116	97.4
22.4	0.193	0.055	28.7	0.056	29.0	0.193	100.1
24.3	0.14	0.040	28.8	0.060	42.7	0.134	95.6
26.4	0.234	0.046	19.7	0.066	28.1	0.209	89.4
28.3	0.155	0.029	18.8	0.034	21.6	0.147	94.6
30.4	0.24	0.059	24.7	0.094	39.3	0.221	92.0
32.5	0.195	0.063	32.5	0.055	28.2	0.169	86.7
34.05	0.131	0.023	17.5	0.027	21.0	0.102	77.7
36.25	0.06	0.014	23.4	0.013	20.9	0.059	98.7
38.3	0.083	0.004	4.7	0.011	12.8	0.041	49.2
42.5	0.051	0.009	17.1	0.005	9.8	0.036	70.4
44.45	0.073	0.027	37.6	0.029	39.5	0.066	90.5
46.3	0.057	0.019	33.6	0.016	28.7	0.045	79.0
48.6	0.056	0.018	31.4	0.014	24.3	0.030	53.3
50.6	0.035	0.015	42.5	0.013	35.8	0.031	87.5
52.1	0.119	0.043	36.0	0.036	29.9	0.091	76.2
54.5	0.077	0.023	30.2	0.014	17.6	0.073	95.0

におけるφ0.45μmのメンブランフィルターの使用はOM法に合わせた内容である。また、シルト・粘土試料の場合、5000rpmで遠心分離するのは、3000rpmでは粒子が十分に落ちず、フィルターが目詰まりしてろ過作業ができないためである。

6.1.2 OM法の修正条件

検液の作成は第5節に示した環境庁提示の公定法（OM法）の手順に準拠したが、以下の4点について修正した。なお、修正後のOM法を修正OM法と呼ぶこととする。

OM法では試料を風乾して検液を作成すると定められているが、本研究では基礎実験に基づき、試料の乾燥による影響を避けるために湿潤試料にて検液を作成した。また、OM法では混合液は500ml以上となるように定められているが、本研究では試料が潤沢に無いので、混合液は50～60mlしか確保できなかった。更に、OM法では静置した試料について遠心分離処理を毎分約3,000回転で20分間実施すると規定されているが、JGS法の修正条件と同じく、シルト・粘土試料の場合は5000回転で15分間遠心分離を行った。そして、最後にOM法では、

第3表 3本のボーリングコア (GS-MHI-1,GS-KNJ-1,GS-KM-1) から採取した分析試料の含水比とpH・EC値 EC値は混合液の希釈率の逆数を乗じて補正した値。JGSとOMはそれぞれ分析法を示す。詳細は本文参照のこと。

Table 3 Water content, pH and EC value of the GS-MHI-1, GS-KNJ-1 and GS-KM-1C cores. EC is presented by correction value that multiplies the reciprocal of the dilution rate of the compound liquid. JGS and OM: analysis method.

GS-MHI-1						GS-KNJ-1						GS-KM-1C					
深度 (m)	含水比	JGS pH	JGS EC (mS/cm)	OM pH	OM EC (mS/cm)	深度 (m)	含水比	JGS pH	JGS EC (mS/cm)	OM pH	OM EC (mS/cm)	深度 (m)	含水比	JGS pH	JGS EC (mS/cm)	OM pH	OM EC (mS/cm)
1.82 - 1.99	0.30	6.9	0.959			2.40 - 2.60	0.32	7.4	2.071	7.2	2.313	2.30 - 2.40	0.41	7.0	0.855	7.2	1.186
2.20 - 2.40	0.38	7.2	0.541	6.3	0.478	4.40 - 4.60	0.33	7.4	0.714	7.3	0.909	4.30 - 4.40	0.34	7.6	1.417	7.5	2.400
3.45 - 3.55	0.45	6.5	0.983			6.50 - 6.70	0.29	7.2	0.543	7.2	0.724	4.80 - 4.90	0.39	7.9	2.113	8.0	4.565
4.05 - 4.25	0.26	6.3	1.076	6.2	0.763	8.40 - 8.60	0.52	8.7	2.156	7.9	2.288	5.80 - 5.90	0.49	8.4	3.226	8.6	4.706
5.30 - 5.40	0.19	6.2	0.896			10.20 - 10.40	0.44	8.8	3.684	8.4	3.591	6.70 - 6.80	0.45	8.9	4.310	8.8	8.000
6.30 - 6.50	0.25	7.0	0.547	6.2	0.417	12.50 - 12.70	0.49	8.3	3.150	8.4	3.939	8.60 - 8.70	0.41	9.1	6.545	9.0	7.750
7.50 - 7.60	0.26	6.9	1.033			14.62 - 14.79	0.73	8.1	3.099	8.4	3.288	10.20 - 10.30	0.44	9.3	3.898	9.1	10.000
8.30 - 8.50	0.28	7.6	0.929	6.7	0.757	16.50 - 16.70	0.54	8.9	3.607	8.3	3.889	12.00 - 12.10	0.44	9.3	6.034	9.2	7.609
9.15 - 9.35	0.53	8.8	3.658			18.40 - 18.60	0.23	9.2	4.162	8.7	5.261	14.60 - 14.70	0.58	9.0	3.333	8.8	7.000
10.20 - 10.40	0.54	8.9	6.152	8.1	3.915	19.70 - 19.86	0.54	8.8	3.065	8.9	3.093	15.50 - 15.70	0.56	9.0	7.612	8.9	7.759
11.40 - 11.50	0.53	9.1	6.553			20.40 - 20.60	0.63	8.6	2.938	8.8	2.921	18.20 - 18.40	0.58	8.8	4.412	8.9	7.333
12.30 - 12.50	0.48	9.1	8.344	9.3	4.694	22.40 - 22.60	0.56	8.9	2.500	9.0	2.982	19.10 - 19.30	0.60	8.9	3.286	8.8	7.581
13.30 - 13.40	0.47	9.1	8.961			24.30 - 24.50	0.57	8.7	2.906	8.7	3.333	20.57 - 20.77	0.64	8.9	3.699	8.7	5.882
14.32 - 14.50	0.53	9.2	8.982	8.5	5.801	26.40 - 26.60	0.47	8.8	3.390	8.9	2.255	21.60 - 21.80	0.66	9.0	3.649	8.6	5.429
15.30 - 15.40	0.50	9.3	9.333			28.30 - 28.50	0.33	9.0	3.104	8.7	2.273	23.60 - 23.80	0.63	8.5	3.944	8.9	4.091
16.30 - 16.50	0.47	9.4	8.789			30.40 - 30.60	0.52	8.6	2.758	8.9	2.500	25.75 - 25.90	0.61	9.0	3.286	8.7	5.156
17.30 - 17.50	0.50	9.1	9.188	8.9	5.856	32.50 - 32.70	0.71	8.8	2.254	9.0	1.901	26.60 - 26.80	0.64	8.9	4.507	8.9	4.328
18.30 - 18.50	0.59	9.0	7.801	9.6	4.918	34.05 - 34.25	0.35	9.4	1.932	7.6	2.257	28.00 - 28.20	0.62	8.4	3.521	9.1	3.846
19.40 - 19.50	0.59	9.2	7.348			36.25 - 36.45	0.32	8.8	1.262	8.0	2.344	30.03 - 30.17	0.23	9.1	3.778	8.4	4.750
20.50 - 20.70	0.71	9.0	6.695	9.3	4.792	38.30 - 38.50	0.27	8.4	2.783	7.5	1.185	32.03 - 32.23	0.43	8.3	2.250	7.8	3.578
20.70 - 20.90	0.78	8.8	6.515			40.60 - 40.80	0.31	7.7	1.341	7.3	2.000	33.60 - 33.80	0.34	8.2	1.327	7.8	1.857
21.80 - 21.90	0.67	9.0	6.553	9.5	4.053	42.50 - 42.70	0.25	7.2	1.513	7.1	1.000	35.60 - 35.80	0.33	7.5	1.000	7.4	1.706
22.30 - 22.50	0.76	8.7	6.273	8.9	3.962	44.45 - 44.65	0.47	7.4	1.000	7.3	1.447	37.60 - 37.80	0.36	6.9	0.780	7.2	0.972
23.50 - 23.60	0.64	9.0	6.329			46.30 - 46.50	0.39	7.5	1.098	6.6	1.538	38.70 - 38.90	0.27	7.0	1.024	7.2	2.000
24.50 - 24.70	0.65	9.0	6.239	9.6	3.774	48.60 - 48.80	0.39	7.6	0.900	7.3	1.513	40.20 - 40.40	0.25	7.2	1.308	7.0	1.692
25.30 - 25.40	0.78	9.0	5.411			50.60 - 50.80	0.42	7.1	0.811	6.8	1.619	41.10 - 41.30	0.43	7.0	1.036	7.1	1.409
26.20 - 26.40	0.85	9.0	5.382	9.6	3.276	52.10 - 52.30	0.55	7.1	1.065	6.6	0.873	43.03 - 43.23	0.38	7.0	1.288	7.1	2.179
27.10 - 27.20	0.82	8.9	5.076									44.60 - 44.80	0.37	7.2	1.275	7.3	1.316
28.30 - 28.50	0.77	9.1	4.626	8.3	3.388							45.20 - 45.40	0.26	7.1	0.897	7.1	1.308
29.40 - 29.50	0.71	9.2	4.246									46.30 - 46.50	0.30	7.0	1.977	7.0	1.133
30.20 - 30.40	0.81	9.0	4.173	9.6	2.823							48.30 - 48.50	0.36	7.0	1.160	7.0	1.541
30.90 - 31.00	0.64	9.3	4.694									50.65 - 50.85	0.43	7.0	1.000	7.1	1.156
31.10 - 31.20	0.78	9.2	4.092									51.20 - 51.40	0.37	6.9	1.059	7.0	1.316
32.40 - 32.60	0.68	9.0	3.601	8.9	2.792							52.15 - 52.35	0.31	6.9	0.463	6.9	0.667
33.60 - 33.70	0.63	9.1	3.418														
34.60 - 34.80	0.46	8.8	3.157	8.5	2.035												
35.30 - 35.40	0.36	8.8	2.170														
36.20 - 36.40	0.35	8.7	1.840	7.5	1.429												
37.30 - 37.40	0.32	8.7	2.042														
38.30 - 38.50	0.34	7.6	1.418	7.1	1.000												
39.60 - 39.70	0.34	7.8	1.459														
40.50 - 40.70	0.37	7.9	1.661	7.1	1.067												
41.50 - 41.60	0.41	7.8	1.462														
42.40 - 42.60	0.53	7.7	1.157	7.2	0.856												
43.30 - 43.38	0.44	7.7	1.594														
43.60 - 43.70	0.44	7.7	1.305														
44.40 - 44.60	0.41	7.7	1.621	7.2	1.085												
45.15 - 45.25	0.35	7.8	1.415														
46.40 - 46.60	0.59	7.7	1.133	7.3	0.878												
47.40 - 47.50	0.63	7.4	0.939														
48.65 - 48.75	0.31	7.3	1.086	6.9	0.924												
49.10 - 49.20	0.30	7.2	1.093														
49.50 - 49.60	0.34	7.1	1.191	6.7	1.044												
53.70 - 53.80	0.25	7.4	0.610														
54.50 - 54.70	0.27	7.9	0.465														

土壌試料を混ぜる溶媒を純水に塩酸を加え、水素イオン濃度指数が5.8以上6.3以下となるようにして作成することと指定されているが、この溶媒では地下環境の条件を著しく変化させるものであるため、溶媒としては本研究では単に超純水を利用することとした。

6.2 検液の測定

検液はコア試料を用いて作成するため少量である。本研究では少量の検液でも測定できる機器を用いることとし、pHはtwin pHを用いてガラス電極法により、ECはtwin cond (共にHORIBA)を用いて検液作成後ただちに

測定した。また、主要なイオンの濃度では、HCO₃イオンは、硫酸滴定により求めたアルカリ度をHCO₃イオン濃度とみなして求めたが、それ以外のイオンは、検液を更に10,000rpmで遠心分離して腐植物と思われる細粒物を落とした後、イオンクロマトグラフィにて測定して求めた。

6.3 粒度分析

堆積物の基礎データとして、ふるい法による粒度分析を実施した。分析は、初めに試料の乾燥重量を測定し、分散剤としてヘキサメタリン酸ナトリウムを加え、超音

波洗浄器で分散させて、Tylerの60メッシュ（ ϕ 0.25mm）と250メッシュ（ ϕ 0.063mm）のふるいで水洗し、試料の堆積物粒子を分離した。乾燥後、各メッシュに残った堆積物試料の重量を測定して重量百分率を求めて表示した（第5.1, 5.2図）。

7. EC値の補正計算

本実験では湿潤試料を用いているため、サンプルの含水比によって検液中の間隙水の濃度が変化する。すなわち、検液を作成する際、乾燥した粒子重量を基準にその5倍（修正JGS法）ないし10倍（修正OM法）になるように検液を調整するが、検液重量は間隙水と超純水の合計重量であるため、含水比が大きい試料は検液中の間隙水の割合は大きくなり、小さい試料は割合が小さくなる。また、JGS法とOM法では粒子重量と検液重量との比が異なるため、測定値のままでは両方法による測定結果を比較することができない。

EC値は溶液中の総イオン量を示し、超純水（EC＝0mS/cm, pH5.9）を加えることにより化学反応が生じてイオンの総量は変わらない。したがって、各検液の間隙水の含水比（第3表）を計算し、溶媒に対する間隙水の希釈率を求める。希釈率はつぎの式から求められる。

$$\text{希釈率} = \text{含水比} / (\text{混合比の逆数})$$

ここで、混合比（試料の乾燥質量に対する溶媒の質量比）はJGS法では5、OM法では10である。

この希釈率の逆数をECの測定値に乗じることにより、個々の分析試料の間隙水のEC値とみなした。しかし、pHは溶液中に存在するHイオン総量の濃度を指数で示したものであるため、希釈率のみで単純にもとの間隙水のpHを推定できない。よって、本論文ではpHは測定値、ECは補正值を用いて示した（第3表）。

8. pH及びEC値

GS-MHI-1, GS-KNJ-1, GS-KM-1Cの3本のコア試料の懸濁液から抽出した検液に関するpH及びECの測定結果を第5.1, 5.2図, 第3表にそれぞれ示す。各コアのデータとしては、既存文献に基づき、岩相柱状図、堆積相・堆積システム区分を示し、今回求めた粒度組成を併記したなお、GS-KM-1コアについては、比較のため、泥水材料にベントナイトを用いたGS-KM-1Aコアの柱状図と分析値もGS-KM-1Cのデータと並べて表示した（第5.3図）。また、GS-KNJ-1コアのうち、OM法のpHとECプロファイルは、第4図の湿潤試料のpHとECプロファイルに深度56m以深の2点を加えたものに相当する。

8.1 pHの変化

pHの深度変化プロファイル及びそれとコア堆積物の堆積環境との関係は、以下のように各コア共通した特徴を示す。

GS-MHI-1：JGS法では、pHは深度2～5mでpH6～7のほぼ中性を示し、深度5～9mにおいて急にpH9まで高くなり、深度34mまではpH9前後の弱アルカリ性を示す。そして、深度34～38m間でpH9からpH8へ急に低下し、深度50mまでpH8からpH7へと緩やかに低くなりほぼ中性を示す。OM法でもほぼJGS法と同様の値の深度変化プロファイルを示すが、深度2～10mと深度35～49.5mではOM法の方が全体的にpHは低くpH6強ないしpH7付近を示している。

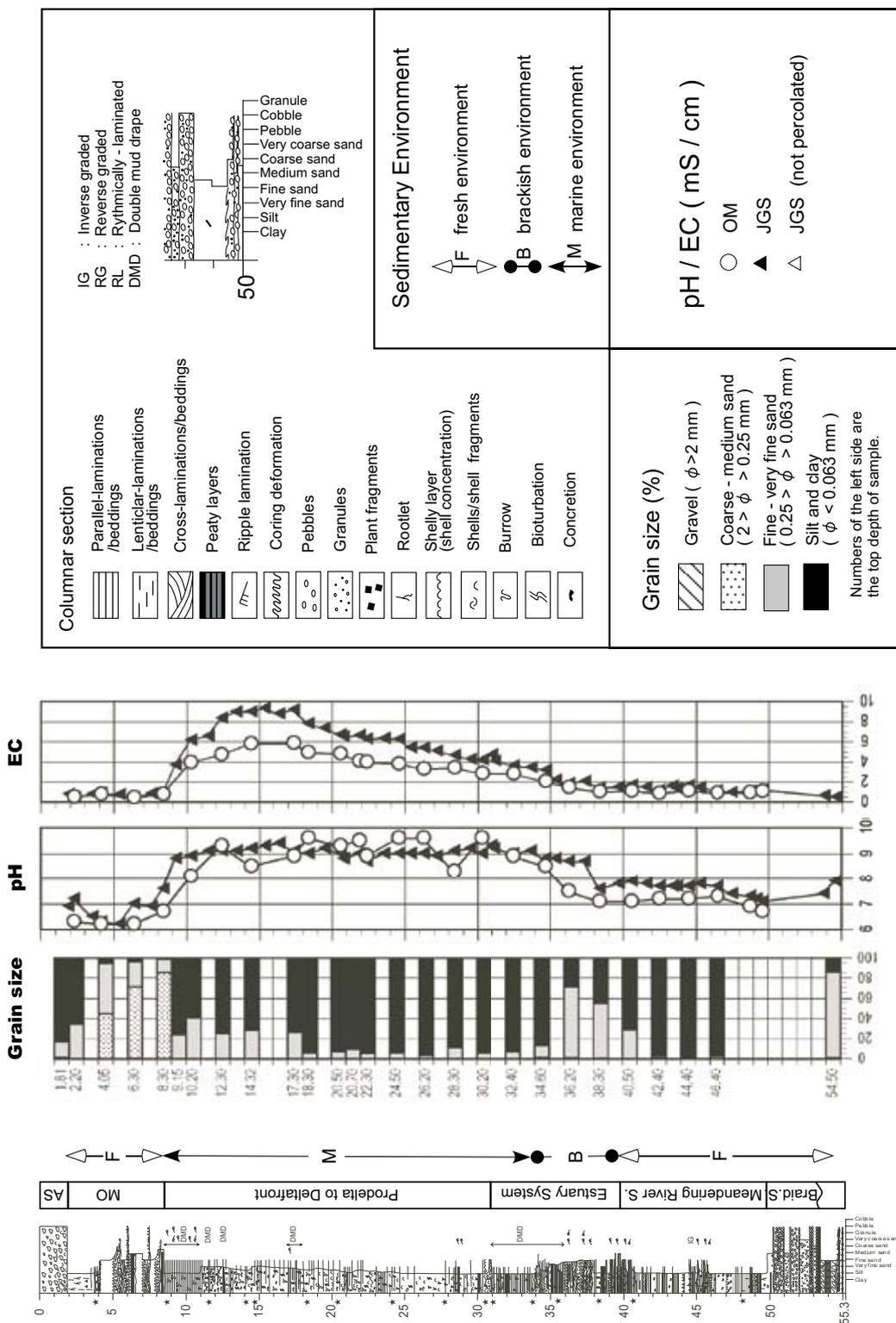
GS-KNJ-1：JGS法では、pHは深度2.5～7mでpH7付近の中性、深度7～8.5m間でpH7からpH9へ急に高くなり、深度34mまでほぼpH9の弱アルカリ性が一定する。そして、深度34mから43mにかけてpH9からpH7へ漸減、そして、再び深度43～52mでpH7強の中性を示す。OM法で得られたpHの値もJGS法と類似した深度変化を示すが、深度34～39mでJGS法のpHよりも全体に少し低い。

GS-KM-1C：JGS法では、pHは深度2～7mでpH7からpH9へと高くなり、深度7～30mではpH9の弱アルカリ性を示す。そして、深度30～38mでpH9から7へと低下し、深度38～52mにおいてpH7の中性を示す。OM法で得られたpHの値もJGS法と類似した値の深度変化を示すが、深度30～34mでJGS法のpHよりも全体に少し低いという違いがある。

以上をまとめると、3本のコアを通じて、pHの深度変化は、pH8～9程度で一定した値の弱アルカリ性を示すコア中部の区間を挟んで、それより上位・下位に向かってpHは連続的に低下し、コアの最上部・最下部の区間で約pH7で一定した値の中性を示すという深度変化を示す。ただし、GS-KM-1Cではこの最上部の中性の区間が欠如している。こうしたpHの深度変化に認められる最上部から最下部の5つの区間を最上部低値安定区間、上部遷値区間、中部高値安定区間、下部遷値区間、最下部低値安定区間と呼ぶことにする。

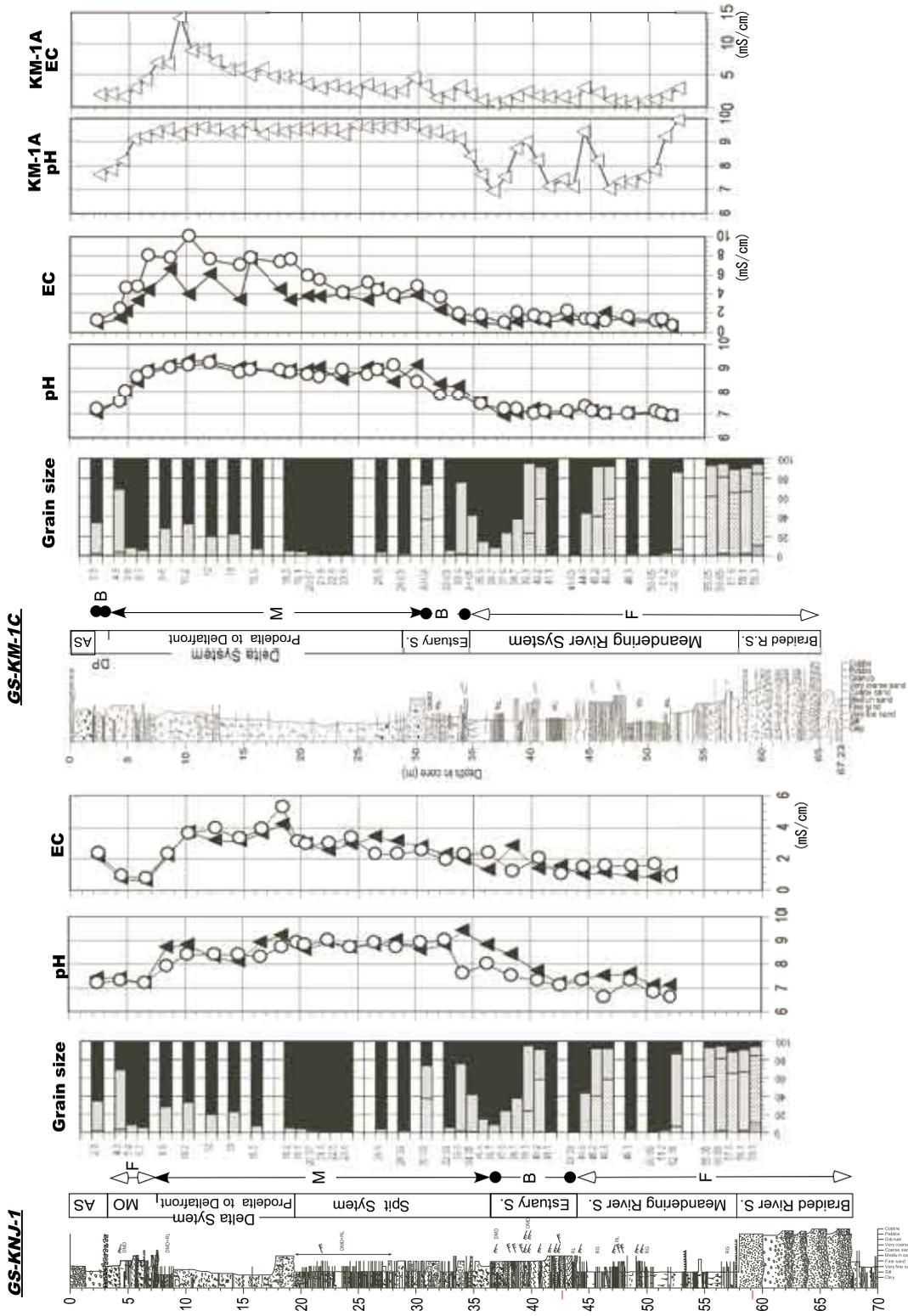
pHの深度変化プロファイルにおける各区間の深度範囲は、3本のコアで同じではない。しかし、各コアで設定された堆積システム区分や貝及び珪藻の産出、一部C14年代から得られる堆積曲線から判断された海成・汽水成・淡水成環境の区分（宮地ほか、2004；中島ほか、2006；田辺ほか、2007；中西ほか、本特集号）とを比較すると、3本のコアを通じて共通した関係が認められる。すなわち、中性を示す最上部低値安定区間は、デルタシステム最上部のデルタプレーンの蛇行河川堆積物にあたり、淡水成環境に限定される。最も海よりのサイト

GS-MHI-1



第5.1図 GS-MHI-1コアの堆積物粒度組成とpH・ECの深度変化。地質柱状図と堆積システム区分は中西ほか(本特集号)から引用。AS:人工土, MO:現世の氾濫原堆積物

Fig. 5.1 Grain size composition, pH and EC depth change profile of the GS-MHI-1 borehole core. Geological column and sedimentary facies are after Nakanishi *et al.* (this issue). AS: Artificial soil, MO: Modern river sediment



第 5.2 図 GS-KNJ-1 と GS-KM-1C コアの堆積物粒度組成と pH・EC の深度変化。GS-KNJ-1 コアについては、GS-KM-1C に加えて、ベントナイト泥水を用いて掘削された GS-KM-1A コアも、泥水材料の影響を示すためにその値を表示した。EC 値はいずれも希釈率で測定値を補正した値。地質柱状図と堆積システム区分については、GS-KNJ-1 は田辺ほか (2007)、GS-KM-1C は田辺ほか (2006) から引用。凡例は第 5.1 図を参照。凡例は第 5.1 図を参照。AS: 人工土, DP: デルタプレーン, MO: 現世の氾濫原堆積物

Fig. 5.2 Grain size composition, pH and EC depth change profile of the GS-KNJ-1 and GS-KM-1C borehole cores. The GS-KM-1A core was drilled with bentonite used drilling water, so that the value is assumed to be reference data. Geological column and sedimentary facies are after Tanabe *et al.* (2007) for GS-KNJ-1, after Tanabe *et al.* (2006) for GS-KM-1C.

であるGS-KM-1コアにおいてpHの同区間が存在しないことは、上記の蛇行河川堆積物が欠如していることと符号する。一方、弱アルカリ性の中部高値安定区間は海成環境の堆積物に限定される。すなわち、デルタシステムのうち海成環境を示すデルタフロントからプロデルタの堆積物、及びGS-KNJ-1ではその下位に位置する海成環境の砂嘴システム(田辺ほか, 2006)、GS-MHI-1ではエスチュアリーシステムのうち海成の最上部の堆積物(中西ほか, 2010)が相当する。そして、中性の最下部低値安定区間の大半は淡水成環境を示す蛇行河川システムに相当する。pHの変化区間である上部と下部の変化区間は淡水成と海成との堆積環境の変化する際の堆積物に相当する。

8.2 ECの変化

ECの深度変化プロファイル及びそれとコア堆積物の堆積環境との関係についても、以下のように各コア共通した特徴を示す。

GS-MHI-1 : JGS法では、ECは深度2～8mは安定して約1mS/cmを示すが、深度8～12mでは約9mS/cmまで値が高くなり、深度12～17mにおいて約9mS/cmの高EC値を示す。そして、深度17mから38mにかけて9mS/cmから2mS/cmまで低下する。それ以深では深度50mにかけて1.5mS/cm前後で一定する。OM法で得たECは、深度変化のプロファイルの形状は類似しているが、中央部の凸部の値がJGS法に比較して値が最高6mS/cm程度と低い。

GS-KNJ-1 : 本コアのECは小さな変化伴うが、JGS法とOM法とはほぼ同様の深度変化プロファイルを示す。深度2.5～4.5mで2.0から0.7mS/cmへと少し低下した後、深度6.5mにかけて1mS/cm弱の低EC値を示すが、深度6.5～10m間で約4mS/cmまで値が高くなる。そして、深度10～26.5mは約3～4mS/cmの比較的一定した高EC値を示し、深度26.5mから40mにかけて約1mS/cmまで低下した後、深度40～52mで約1mS/cmで一定した低EC値を示す。

GS-KM-1C : OM法では、ECは深度2～7mで約1mS/cmから4mS/cmへと急に高くなり、深度7～19m区間は約8mS/cmの高EC値で一定し、深度19～34mにかけて約2mS/cmへとゆるやかに低下した後、深度34～52mで約1mS/cmの一定した低EC値を示す。JGS法によるECの深度変化プロファイルの形状はOM法のそれに類似しているが、深度5mから23mの区間では、JGS法に比べて全体にECの値が低く、安定しない区間が認められる。

以上をまとめると、EC値の変化はJGS法とOM法ともに、3～9mS/cmの高い値をとる中部高値安定区間を挟んで、それより上位・下位に向かってECは低下し、最

上部・最下部では1～2mS/cmの低い値で一定する。こうした深度変化のプロファイルは、pHのプロファイルとその形状や区間境界の深度は類似している。そのため以下では、pHの場合と同様に、EC値の深度変化プロファイルとその値と値の変化の特徴に基づき、最上部低値安定区間、上部変化区間、中部高値安定区間、下部変化区間、最下部低値安定区間と呼ぶことにする。しかし、各区間の深度も異なる場合があり、プロファイルの形状に違いが認められる。主な違いは、中部高値安定区間の深度範囲がECではpHの1/2～2/3と短く、下部変化区間がその分長くなり値の変化がゆるやかであることである。

こうしたECの深度変化プロファイルは、各コアの堆積システム区分と比較すると、pHとは少し異なる対応関係が認められる。すなわち、最上部低値安定区間が、デルタシステム最上部の蛇行河川相に、最下部低値安定区間の大半が淡水成環境を示す蛇行河川システムに相当することはpHと同じ関係であるが、中部高値安定区間は海成環境の上半部だけであり、下半部は深度区間が長くなった下部変化区間に対比されるという点が異なる。

8.3 粒度組成とpH・EC

本研究で化学分析を行った堆積物試料の粒度組成のうちわけは、全93試料のうち、泥から砂質泥が72試料、泥質細砂から細砂が14試料、そして中-粗砂が7試料、である。分析試料の粒度は、堆積環境との関連が強く、デルタフロント上部からデルタプレーン、プロデルタの最下部、エスチュアリーシステムの下半部から蛇行河川システムにかけては粗粒な堆積物試料が多く、一方、デルタフロント下半部からプロデルタにかけては細粒な堆積物試料が卓越する。しかし、上記に記述したpHとECの深度変化プロファイルからは、こうした粒度の違いによる影響が明瞭には認められない。

9. 考察

ボーリングコアの堆積物試料から作成した懸濁液のpH及びECの分析結果に関して、第一に、本論で用いたJGS法とOM法の二つの分析法によって生じた値の違い、第二に、分析法によらず認められる深度変化プロファイルの要因について、考察する。

9.1 懸濁液作成方法による値の差の原因

pHとECともに、JGS法とOM法の検液作成法の違いによっても、深度変化のプロファイルの形状は同じであった。しかし、その値は、特定の深度区間において両者の違いが認められ、pHに比べてECでその差は大きく、かつ幅広い深度区間で認められた。これらの違いが発生した原因の解明は、その数値を評価する上で重要であるので、以下検討する。

pHの値はJGS法とOM法との検液作成方法の違いによる値の差は、3本のコアを通じてpHの上部と下部変化区間に限定的に認められ、いずれのコアにおいてもOM法の値が低く、最大差は約1.5である。一方EC値は、両方法による値の違いが、3本のコアのうち、GS-KNJ-1コアではほぼ一致した値を示しているが、GS-KM-1コアとGS-MHI-1コアでは上部・下部の両遷値区間に加えて中部高値安定区間においても認められ、最大差は9mS/cmと大きい。しかも特異なのは、高い値を示す分析方法が、GS-KM-1コアではOM法、GS-MHI-1コアではJGS法と両コアでは異なる。

pHとECとは必ずしもその値が平行して増減するわけではない。EC値は水中に溶解している電解質の総量におおよそ相当することから、EC値の増加は溶存イオン量の増加と見なせる。一方、pHの値はHイオン濃度を指数で表示するため、総イオン濃度が直接反映するわけではなく、水素イオンが増加する傾向にあっても、その値の変化は小さい。しかも、間隙水に普遍的に含まれる炭酸塩の緩衝作用によって、その傾向は鈍化されると考えられる。こうした特性は、しかし、GS-KM-1CにおけるpHとECの深度変化プロファイルでのJGS法とOM法の値の差を説明できるが、GS-KNJ-1コアやGS-MHI-1コアについては説明ができない。そのほかの要因があるものと推定される。

本論では、JGS法とOM法との検液作成方法を両者が類似した条件になるように修正したが、その中でpHとECの値の違いをもたらす要因としては、攪拌程度の違いと溶媒と堆積物試料との混合比率の違いをあげることができる。攪拌程度が大きい場合、混合比率が小さい場合は粘土粒子などの堆積物に吸着している溶存イオンや化合物中の元素が溶出しやすくなると考えられる。攪拌処理では、JGS法では試料を攪拌棒で懸濁させるだけであるのに対して、OM法では6時間振とうすると定められている。OM法ではJGS法に比べて、攪拌が強いだけでなく、反応時間も桁違いに長く確保されているため、JGS法より堆積物粒子からのイオン成分が溶出されやすいものと考えられる。更に、第5.3項で検討したように、pHとECの値の違いが生じている深度区間はいずれも海成から汽水成環境であり、堆積物中には特徴的にパイライト態イオンが含まれる。OM法の6時間振とうは、パイライト態イオンを酸化し硫酸イオンを生成することが考えられる。硫酸イオンの生成は他のイオンの溶出と水素イオンの生成を促進するであろう。一方、検液の希釈度については、OM法は堆積物の乾燥試料質量に対して10倍、JGS法は5倍の超純水を加えるため、OM法ではJGS法に比較して溶質の濃度が薄い。したがって、OM法の懸濁液の方が粒子からのイオン成分が溶出しやすいものと考えられる。

以上のJGS法とOM法の攪拌程度と溶媒と堆積物試料

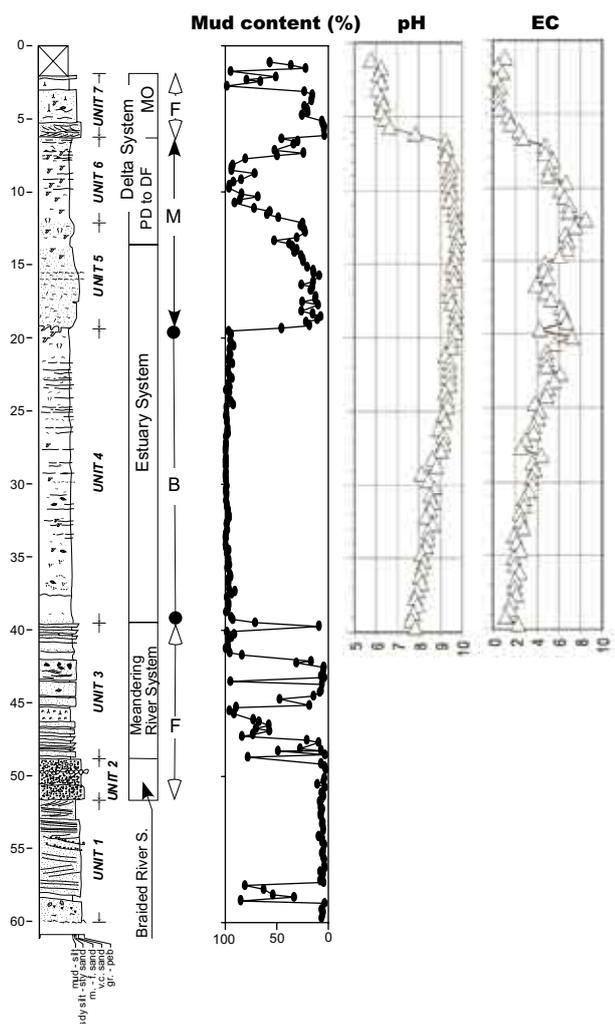
との混合比率の違い、及びECとpHの指標の違いを考慮すると、GS-KM-1CコアのECの深度変化プロファイルにおいて、JGS法よりOM法の方が高いEC値を示す原因とそのpHのプロファイルを説明することができる。一方、両方法で系統的な差がないGS-KNJ-1コア、逆にJGS法の値の方が高いGS-MHI-1コアの結果は、OM法にイオン濃度を下げる要因があったことを示唆する。可能性としては、OM法での6時間振とうにより、堆積物中で凝固している粘土粒子がより多く分散、一部は更に細かく分離し溶媒中にコロイド状に懸濁したことをあげることができる。本論で用いたJGS法とOM法ともに、懸濁液から検液を作成する際に ϕ 0.45 μ mのフィルターによるろ過処理を行ったので、検液からは2～0.45 μ mサイズの粘土粒子はろ過される。そのため、懸濁液中に粘土粒子が多量にあると、振とう後のフィルタリング処理において、これらの粘土粒子がフィルター表面の膜をなし、フィルターを通る懸濁水からイオンを吸着・ろ過する役割を果たしたことが推定される。測定試料については、粒度分析を行ったが、細粒分のうち粘土粒子の割合までは実測していない（第5.1, 5.2図）。この推定を支持する実測データは得られていないので、これ以上の検討は今後の課題としたい。

9.2 pHとECの規則的深度変化とその成因

沖積層のボーリングコア堆積物から作成した懸濁液のpHとECの深度変化プロファイルの特徴について、以下に整理する。同プロファイルは、既述したように、上位より下位へ、最上部低値安定区間、上部遷値区間、中部高値安定区間、下部遷値区間、最下部低値安定区間の5つの区間に識別される（第5.1, 5.2図）。中性でかつ低EC値を意味する最上部と最下部の両低値安定区間は、pHとECともに同一深度範囲であり、淡水成環境の蛇行河川堆積物に限定される。一方、弱アルカリ性、高EC値を意味する中部高値安定区間は、pHに比べてECの同区間が短いがいずれも海成環境の堆積物に限定され、かつECの下部変位区間のうちpHの中部高値安定区間に相当する深度では、GS-MHI-1, GS-KM-1Cでは3mS/cm、GS-KNJ-1では2mS/cm以上の高EC値を示している。また、ベントナイトの泥水材料を利用したために参考資料扱いとしたGS-SK-1コアの分析値についても、最下部の蛇行河川システムの分析値が欠けているが、それ以外の深度区間では類似したpHとECの深度変化プロファイルの形状と堆積環境との関係が認められる（第6図）。

前節で考察したように、pHとECの測定値については、処理法の違いで影響をうけることが判明した。更に、粘土粒子の割合やまだ解明されていない要因によっても左右されることが推定される。しかし、pHとECの深度変化のプロファイルの形状は、上述したように、各コアを通じて類似した特徴を示し、各コアの堆積システム・堆

GS-SK-1A



第6図 GS-SK-1コアの含泥率とpH・EC値の深度変化. 本コアのボーリング調査では掘削泥水にベントナイトを使用しているため、参考データとして掲載. EC値は希釈率で測定値を補正した値. 地質柱状図、堆積システム区分と含泥率は石原ほか(2004)を引用. 凡例は第5.1図を参照. PD to DP: プロデルタ～デルタプレーン, MO: 現世の氾濫原堆積物

Fig. 6 Mud content, pH and EC depth change profile of the GS-SK-1 core. The core was drilled with bentonite-used drilling water, so that the value is assumed to be reference data. Geological column, sedimentary facies and mud content are after Ishihara et al. (2004).

積環境の区間と深度的に密接な関係が認められる. こうした関係は、本研究の基礎実験で実施した分析結果では、24時間の振とう処理、試料の乾燥、フィルター処理をしない懸濁液を利用しても、同一の特徴的なプロファイルが得られた(第3, 4図). したがって、これらの特徴は、測定手法や堆積物の粒度、あるいは個々のコアの地域的な堆積環境や地盤環境の履歴の違いを越えた、原位置における沖積層堆積物の普遍的な化学的特性であると判断できる. 一つの有用な結論として、沖積層のコア試料

のpHとECの両深度変化の特徴的なプロファイルを得ることができれば、淡水成と海成の堆積環境を識別する指標として利用できるものと期待される. そして、沖積低地の地下に伏在する海成の沖積層堆積物は、弱アルカリ性で、高EC値を示しているということがいえる. なお、中部高値安定区間のpHは、フィルタリング処理の中で1~1.5低下していること(第3図参照)を考慮すると、原位置の同pHはpH9-10である.

つぎに、各コアに共通して認められるpHとECの深度変化の要因について考察する. なお、pHとECの測定値では、実際の地盤環境に近いJGS法の値を主とし、OM法を必要に応じて参照することとする.

こうした高いpHとECは、堆積物の堆積当時の間隙水に起因するのであろうか. 弱アルカリ性、高EC値を意味する深度区間の堆積物は、海成環境下で堆積したものであるため、堆積時の間隙水は海水に近い化学組成を有していたと推定できる. 海水は35g/Lの高いイオン濃度で、中でもNaイオンとClイオンで全体の90%近くをしめる. 一方、沖積層堆積物試料の懸濁液から得たpHとECの値は、第5.1と5.2図の分析値に示されているように、イオン濃度ははるかに低く、第4図のGS-KNJ-1コアの事例では、主要イオンのうち、直接濃度測定を行わなかったHCO₃イオンを除くと、濃度の高いイオンはNaイオンであり、Clイオン濃度は極めて低い. したがって、その変化のプロセスはさだかではないが、堆積後、地下水の流動やイオンの拡散現象にともない、大幅なイオンの溶脱・移動と化学反応があったことが考えられる. 東京低地から中川低地における沖積層の懸濁液の水質の変化は、堆積物の堆積当時の環境をそのまま保存したのではなく、堆積後の化学変化を反映したものと推定される. その化学変化のプロセスは今後の重要な課題である.

本研究では沖積層の地盤環境を知る手段の取りかかりとして、簡便な懸濁液を検液として用いた. その検液のpHとEC値は、普遍的な深度変化プロファイルを示すこと、そしてその特徴は堆積環境と密接に関係することを明らかにした. しかし、懸濁液は混合物であり、条件により様々な成分が混入しているため、原地盤の堆積物の間隙水の組成やその成因などについて、詳細に議論することは難しい. 今後はより自然の地盤環境に近い試料として間隙水を用いた研究を実施し、地盤環境を評価していく必要がある.

10. まとめと今後の課題

- 1) 沖積層の原位置の化学的特性を得るための懸濁液作成法として、地盤工学会の土質試験法の懸濁液作成法(JGS法)と、環境省の公定法の検液作成法(OM法)の両方法を参照して、適切な検液作成法を得るために行った基礎実験の結果、OM法に規定されているろ

過、乾燥、振とうの各処理によって、pHとECともに影響を受けることが判明した。本実験では、JGS法についてはOM法のろ過処理を加え、OM法では乾燥処理と酸処理を省くという修正をした上で、両方法による分析実験を行った。

- 2) 東京低地と中川低地で得られた3本の層序ボーリングコアの堆積物試料から懸濁液を作成し、そのpHとECを測定した。pHとECの深度方向の変化プロファイルは3本のコアでほぼ共通しており、上位より下位へ、最上部低値安定区間、上部遷値区間、中部高値安定区間、下部遷値区間、最下部低値安定区間の5つの区間に識別される。中性でかつ低EC値を意味する最上部と最下部の両低値安定区間は、pHとECともに同一深度範囲であり、相当する堆積物は淡水成環境に限定される。一方、弱アルカリ性、高EC値を意味する中部高値安定区間は、pHに比べてECの同区間が短いがいずれもデルタシステムの海成環境の堆積物に限定されることが判明した。中部高値安定区間のpHは、懸濁物のフィルタリング処理によって1~1.5低下していること(第3図参照)を考慮すると、原位置の同pHは9-10である。
- 3) 沖積層のコア試料のpHとECの両深度変化の特徴的なプロファイルを得ることができれば、淡水成と海成の堆積環境を識別する指標として利用できるものと期待される。
- 4) 今回得られた沖積層の海成堆積物試料の懸濁水のpHとEC、主要イオン濃度は海水と比較して、イオン濃度が桁違いに低く、イオン組成ともに違っていることから、堆積後現時点までに間隙水が表層水に置き換わり、顕著なイオンの溶脱・移動や化学反応があったものと推定される。

謝辞：本研究を行うにあたり、國本節子氏(産総研)、福田 文氏(元・産総研)には分析作業を補助していただいた。林 武司博士(秋田大学)には分析方法の指導及びデータに関する議論とアドバイスをいただいた。宮地良典氏、田辺 晋博士(産総研)、中西利典博士(元産総研、現在韓国地質資源研究所)にはコア試料採取にあたり大変お世話になった。丸茂克美博士、岡井貴司氏(産総研)には実験を実施するにあたり、様々なご協力をいただいた。石井武政博士、丸井敦尚博士、内田洋平博士(産総研)にはイオン分析を行う際の便宜を図って頂いた。査読者の安原正也博士(産総研)には粗稿に対して適切な査読意見をいただき、内容を改善することができた。ここに記し深く謝意を表します。

文 献

青木 滋(1969) 東京低地の第四紀層について。日本

地質学会第76年学術大会シンポジウム「海岸平野」資料集, 15-20.

- 青木 滋・柴崎達雄(1966) 海成“沖積層”の層相と細分問題について。第四紀研究, 5, 113-120.
- Endo, K., Sekimoto, K. and Takano, T. (1982) Holocene Stratigraphy and paleoenvironments in the Kanto Plain, in relation to the Jomon Transgression. Proceedings of the Inst. Nat. Sci., Nihon Univ., no. 17, 1-16.
- 遠藤邦彦・関本勝久・高野司・鈴木正章・平井幸弘(1983) 関東平野の沖積層。アーバンクボタ, no. 21, 26-43.
- 半谷高久・小倉紀雄(1985) 改訂2版 水質調査法。丸善株式会社, 東京, 378p.
- 市原優子(1960) 海成粘土層にみられる粘土鉱物の風化。地質学雑誌, 66, 812-819.
- 市原 実・市原優子(1971) 大阪層群の海成粘土と淡水成粘土について。竹原平一教授祈念給文集, 173-181.
- 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(2004) 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・堆積物物性と放射性炭素年代。地質調査研究報告, 55, 183-200.
- 石綿しげ子(2004) 東京湾北部沿岸域の沖積層と堆積環境。第四紀研究, 43, 297-310.
- Kaizuka, S., Naruse, Y. and Matsuda, I. (1977) Recent formations and their basal topography in and around Tokyo Bay, central Japan. Quaternary Research, 8, 32-50.
- 加村崇雄(1986) 酸性硫酸塩土壌をめぐる、強酸性土壌と鉄・イオウ細菌。アーバンクボタ, no.25, 50-51.
- 川瀬久美子(2002) 三重県雲出川下流低地における沖積層最上部の堆積環境の推定—堆積物の珪藻分析および混濁水の電気伝導度を用いて—。日本地理学会発表要旨集, 61, 138.
- 木村克己(2004) 巻頭言：都市地質研究の展開。地質調査研究報告, 55, 181-182.
- 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(2006) 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と層序の再検討。地質学論集, no.59, 1-18.
- 小荒井衛・大井信三・横山卓雄(1990) 電気伝導度法による古環境の推定—茨城県筑波台地の例。日本第四紀学会講演要旨集, no.20, 112-113.
- 小荒井衛・中山俊雄・平野義明(1992) 電気伝導度法による沖積層ボーリングの堆積環境の推定。日本第四紀学会講演要旨集, no.22, 98-99.
- 久馬一剛(1986) 東南アジアの低湿地。アーバンクボタ, no.25, 2-7.
- 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 (2004) 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. 地調研報, **55**, 201-219.
- 森山昭雄・渡辺崇・水上順司 (1996) 粘土混濁水の電気伝導度測定による碧海層堆積時の古環境の変遷. 日本地理学会予稿集, no.50, 120-121.
- 中西利典・田辺晋・木村克己・中島礼・内山美恵子・柴田康行 (2011) 埼玉県三郷市彦成地区の沖積層コア (GS-MHI-1) の堆積相・珪藻化石群集組成・物性・放射性炭素年代値. 地調研報, 本特集号, 3-46.
- 中島礼・木村克己・宮地良典・石原与四郎・田辺晋 (2004) 東京都江戸川区小松川と埼玉県草加市柿木において掘削した沖積層ボーリングコアから産出した貝化石群集. 地調研報, **55**, 237-269.
- 中島礼・田辺晋・宮地良典・石原与四郎・木村克己 (2006) 沖積層ボーリングコアにみられる貝化石群集変遷—埼玉県草加市柿木と東京都江戸川区小松川の例—. 地質学論集, no.59, 19-33.
- 日本地下水学会 (2000) 地下水水質の基礎. 理工図書, 東京, 189p.
- 佐藤万寿美・横山卓雄 (1992) 粘土混濁水の電気伝導度による古環境の推定—関西国際空港ボーリング・コアの場合—. 地質学雑誌, **98**, 825-839.
- 田辺晋・石原園子・中島礼・宮地良典・木村克己 (2006) 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, 32-52.
- 田辺晋・中島礼・石原与四郎・中西利典・宮地良典・木村克己・中山俊雄・柴田康行 (2007) 東京低地東縁における完新統砂嘴堆積物の時空間分布. 地調研報, **57**, 261-288.
- 東京都土木技術研究所 (1969) 東京都地盤地質図 (23区内) —東京都地質図集2—. 東京都土木研究所.
- 東京都港湾局 (2001) 新版 東京港地盤図. 89pp, 付図9葉.
- 内園立男 (2007) 濃尾平野ボーリングコアの粘土混濁水の電気伝導度と堆積環境の関係—沖積層の例—. 地球科学, **61**, 179-186.
- 内園立男・森勇一 (2004) 濃尾平野南部ボーリングコアの粘土混濁水の電気伝導度およびpH測定に基づく堆積環境の推定. 第四紀研究, **43**, 375-382.
- 安井賢・吉田真見子・卜部厚志 (2004) 沖積粘性土層の電気伝導度・pH値と堆積環境の比較. 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 29-32.
- 横山卓雄・佐藤万寿美 (1987) 粘土混濁水の電気伝導度による古環境の推定—千里丘陵東端部および琵琶湖湖底におけるボーリング・コアの場合—. 地質学雑誌, **93**, 667-679.

(受付: 2010年12月6日; 受理: 2010年12月27日)