

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

石原与四郎¹・木村克己²・田辺 晋²・中島 礼²・宮地良典²・堀 和明³・稲崎富士²・八戸昭一⁴

Yoshiro Ishihara, Katsumi Kimura, Susumu Tanabe, Rei Nakashima, Yoshinori Miyachi, Kazuaki Hori, Tomio Inazaki and Shoichi Hachinohe (2004) Sedimentary facies, physical properties, and radiocarbon dates of the GS-SK-1 core obtained from Kakinoki district, Nakagawa lowland, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(7/8), p.183 - 200, 5 figs., 1 table.

Abstract: “Chuseki-so”, which is an incised-valley fill deposited since the last glacial maximum, is distributed under the Nakagawa Lowland, Saitama Prefecture, central Japan. In this study, sedimentary facies, radiocarbon dates and sediment properties of the GS-SK-1 cores (GS-SK-1A, GS-SK-1N and GS-SK-1T) drilled at a central part of the Nakagawa Lowland, were analyzed for clarifying stratigraphy and sedimentary environments of incised valley fills in the Nakagawa Lowland. The “Chuseki-so” of the GS-SK-1A core is composed of fluvial to shallow marine sediments as follows, in ascending order: (1) fluvial channel fills of pebble to pebbly sand, (2) flood plain to salt marsh deposits of alternation of sand and mud, (3) muddy tidal flat deposits of massive mud containing molluscan fossils, (4) sandy tidal flat to sand shoal deposits of poorly-sorted silty sand containing shell fragments and granules, (5) inner bay (prodelta to delta front) deposits of massive mud intercalated by thin ripple sand and abundant burrows, and (6) fluvial channels fills to flood plain deposits of alternation of sand and mud. Nineteen radiocarbon dates, 48,350 to 1,270 yrBP in radiometric ¹⁴C ages, indicate that the incised valley fills are formed by a set of transgression and regression. Sediment properties, i.e. N-value, mud contents, bulk densities, magnetic susceptibility, water contents, luminosity and color contrasts of these deposits, vary stratigraphically, corresponding to sedimentary facies or at boundaries of them.

Keywords: Holocene, incised-valley fill, Nakagawa Lowland, radiocarbon date, sedimentary facies, physical property

要 旨

埼玉県の中川低地地下には、最終氷期に形成された開析谷を埋積する沖積層が分布する。本報告では、中川低地中央部に掘削されたGS-SK-1コア(GS-SK-1A, GS-SK-1N, GS-SK-1T)から得られた堆積相、放射性炭素年代、堆積物物性をもとに、中川低地における沖積層の層序、堆積環境を明らかにした。GS-SK-1Aに認められる沖積層は次のような河川 - 浅海性堆積物であることがわかった。すなわち、下位から(1)河川チャネル充填堆積物である礫 - 砂礫層、(2)氾濫原 - 塩水湿地堆積物である砂泥互層、(3)泥質干潟堆積物である貝化石を含む塊状泥層、(4)内湾(プロデルタ - デルタフロント)堆積物である巣穴状生痕やリップル砂層を含む塊状泥層、(5)河川チャネル充填堆積物 - 氾濫原堆積物で

ある砂泥互層から構成される。19点の放射性炭素年代(48,350~1,270 yrBP)はこれらの開析谷充填堆積物が、1回の海進・海退に伴って形成されたことを示唆する。そして堆積物物性(N値、泥分含有率、湿潤・乾燥密度、帯磁率、含水比、L*a*b*による色調)は堆積相やその境界に関連して変化することが明らかになった。

1. はじめに

東京低地から中川低地の地下に分布する沖積層は、淡水 - 汽水環境で堆積した七号地層と、その上位に重なり主として内湾環境で堆積した有楽町層からなるとされている(青木・柴崎, 1966; Shibasaki *et al.*, 1971; Endo *et al.*, 1982; 遠藤・高野, 1983; 遠藤ほか, 1992など)。このうち、下位の七号地層は最下部の基底礫層

¹福岡大学理学部地球圏科学科 (Department of Earth system science, Faculty of Science, Fukuoka University, Jonan-ku, Fukuoka, 814-0180 Japan)

²地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, GSJ, AIST Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, 305-8567, Japan)

³名城大学理工学部環境創造学科 (Department of Environmental Science and Technology, Faculty of Science & Technology, Meijo University, Tempaku-ku, Nagoya, 468-8502 Japan)

⁴埼玉県環境科学国際センター (Center for Environmental Science in Saitama, Kisai-cho, Saitama, 347-0115 Japan)

(Basal Gravel: BG)とその上に重なる砂泥互層からなる。一方、上位の有楽町層は、Holocene Basal Gravel (HBG)と呼ばれる砂礫層を介して七号地層を不整合に覆い (Endo *et al.*, 1982; 遠藤ほか, 1992など), 厚い泥層とその上に重なる砂層もしくは砂泥互層からなる。有楽町層は下部の泥層部が有楽町層下部層, 上部の砂層部が有楽町層上部層と細分されている (遠藤ほか, 1988aなど)。このような層相の違いはその土質工学的特徴にも反映され, 例えば有楽町層ではN値が0に近い軟弱なものであるのに対し, 七号地層は泥層で5~10, 砂層で10~30と高いN値を持ち, 工学的には下位にある更新統と近い特徴を示す (N値の話編集委員会, 1998)。

これらの地層の堆積環境について, 中川低地の例では, 層序ボーリングで得られた層相分布 (遠藤・高野, 1983; 遠藤ほか, 1988b; 遠藤ほか, 1992)や珪藻化石の研究 (小杉, 1988; 小杉, 1992など)に基づいて詳細な復元がなされ, 下部が河川性の七号地層からなり, HBGから上位の有楽町層は累積的に堆積するシステム及び急速に前進するデルタシステムからなると考えられている (遠藤ほか, 1995など)。

近年になり, 地層の形成過程の検討に海水準変動を念頭に置いたシーケンス層序学が取り入れられるようになる (Van Wagoner *et al.*, 1988; Vail *et al.*, 1991), 主として開析谷を埋積するエスチャリー性の堆積物に関しても, 堆積モデルや堆積システム (Allen and Truilhe, 1988; Dalymple *et al.*, 1992; Dalymple *et al.*, 1994など)が海水準変動や詳細な放射性炭素年代値に基づいて論じられる研究が日本においても多くなってきた (例えば, Saito, 1995; 増田ほか, 2000; 増田, 2002; Masuda *et al.*, 2002など)。しかしながら, 古くから研究が行われている東京低地から中川低地にかけては必ずしも多くの放射性炭素年代値や層序ボーリングデータが揃っているわけではなく, これらの地域の沖積層の形成過程を論じるに十分な状態にあるとはいえない。また, 地質ボーリングと土質ボーリングが同じサイトで同時に行われた例は無いため, 得られたN値に対する地質学的・堆積学的に見た層相との正確な対応がつかないなど, この地域の沖積層の堆積過程を考える上での基盤となる土質ボーリングの評価ができていない現状がある。

産業技術総合研究所では, ユニット融合的共同研究「大都市圏の平野地下地質・構造の総合的解析と地震動予測等の応用研究」(平成14年度)及び分野重点課題「大都市圏の地質災害軽減・環境保全を目的とした地質学的総合研究」(平成15年度~)の研究プロジェクトの中で, 東京低地から中川低地の沖積層について, 堆積相と堆積システム区分, 堆積環境の時空間変遷史, 堆積相と堆積物物性との関係, 層序の再検討などを行うた

めに, ボーリング調査や既存のボーリングコアの見直しを進めている。このうち, 平成14年度に中川低地の中央部, 埼玉県の草加市柿木でのボーリング調査 (GS-SK-1)では, オールコアボーリング, 標準貫入試験, 土質試験サンプル採取用ボーリング及びPS検層をすべて同一サイトで実施した。これらのボーリングは, それぞれ5~9 m間隔の横並びで実施された。本報告では, オールコアボーリングで得られたコアについて, 堆積相そして泥分含有率, 帯磁率, 密度, 色調などの堆積物の物性の特徴をまとめ, 更に19点の放射性炭素年代値を得た。ここでは特に, 層相と堆積物の物性を明らかにする。この検討結果には東京低地から中川低地の沖積層の層相・層序や地層の形成過程, また, 土質ボーリングとの関係を明らかにするうえで重要な意義がある。

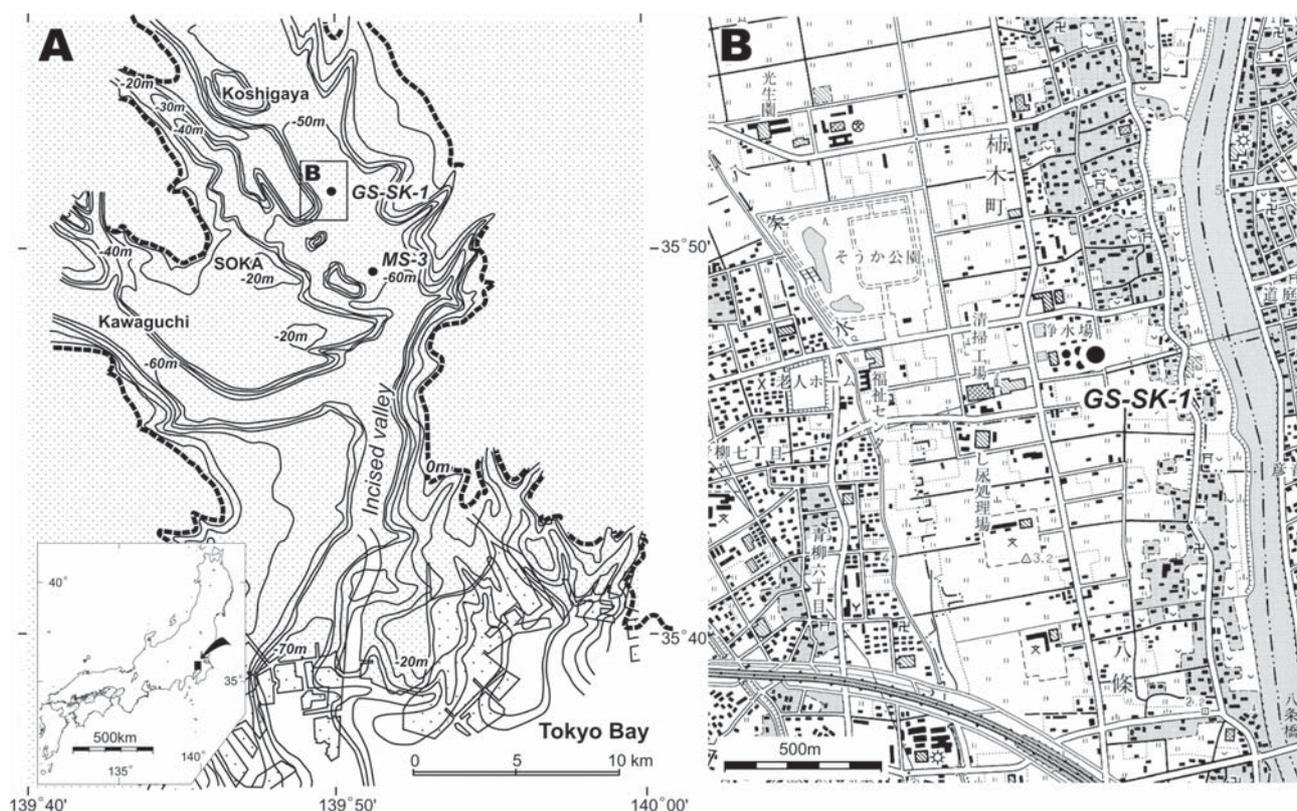
2. 掘削位置と中川低地の沖積層層序

GS-SK-1 ボーリングは, 中川低地中央部に位置する埼玉県越谷市の柿木浄水場の構内で行われた (第1図)。掘削場所は, 中川の自然堤防から後背湿地 (埼玉県, 1979)にかけての地域であり, 世界測地系で北緯35度51分21.1秒, 東経139度50分18.6秒に位置する。ここは中川低地地下の埋没谷中軸の西端付近にあたる。遠藤ほか (1985)はこのサイトのすぐそばの土質ボーリングデータを検討し, 本研究での掘削位置が, 中川低地地下の埋没谷西端付近で沖積層の最も厚い場所であるとされている。

中川低地の沖積層の層序及び埋没谷の形状は, 遠藤・高野 (1983), 遠藤ほか (1988a, 1988b), 遠藤ほか (1992)などによって詳細な検討がなされている。それらによれば, 中川低地には深度が最大50 m, 最も広いところで幅3 kmの埋没谷が認められ, 更に深度20~30 mに埋没段丘面が存在するとされている。遠藤ほか (1988b)はGS-SK-1サイト近くの柿木で得られた土質ボーリングデータを評価し, 深度約38 m~50 mを七号地層, それより上位を有楽町層とし, 深度15~20 m付近には貝化石を含む砂層が発達することが多いとしている。また, 中川低地とその周辺の沖積層から得られた含む放射性炭素年代値約30個をコンパイルし, その堆積過程の復元に用いている。これらは一般に深度に応じて古い値を示すが, 多くのものは4,000 yrBPよりも古い。やや下流になるが, 三郷市に掘削されたMS-3コア (第1図; 遠藤ほか, 1992)では, 深度方向に連続的に13個の放射性炭素年代値 (11,480~5,010 yrBP)が得られている。

3. 掘削方法

本ボーリングでは, GS-SK-1A, GS-SK-1N, GS-SK-1T



第1図 GS-SK-1の掘削地点(A, B)と東京, 荒川, 中川低地の地下の埋没谷の分布(遠藤ほか, 1992)(A). 埋没谷の等高線間隔は10 m, 国土地理院発行25,000分の1地形図「越谷」を使用.

Fig. 1 Locality of the GS-SK-1 site (A, B) and distribution of an incised valley under the Tokyo, Arakawa and Nakagawa lowlands after Endo *et al.* (1992) (A). Intervals of contour lines in (A) are 10 meters. B is based on topographic map Koshigaya, scale 1:25,000 by the Geographic Survey Institute.

の3つのボーリングがそれぞれ掘削された. 最も北に位置するGS-SK-1AからS80°Eに向かって9mの間隔を置きGS-SK-1T, そして5.5mの間隔を置きGS-SK-1Nとほぼ直線的に並ぶ. GS-SK-1Aは層相及び堆積物の物性を検討するためのオールコアボーリング, GS-SK-1NはN値及び土質記載を得るための標準貫入試験ボーリング, GS-SK-1Tは土質力学試験用試料を得るための不攪乱試料採取ボーリングである. これらのコアのうち, 本報告では主としてGS-SK-1A(以下断りが無ければGS-SK-1とする)を使った各種データ収集及び検討を行った.

オールコアは主としてロータリー式三重管サンプラーを用いて内径86mm, 1m単位で採取している. 礫からなり, 採取の難しい49.0~52.0mの区間のみ直径の細い68mmの打ち込みコアパックが用いられた. 三重管サンプラーを用いると, シューの部分に10cm程度サンプラーに取まらないため, この部分は別に採取・保管した.

4. コアの解析手法と手順

得られたコアはすべて半裁し, 半分を各種サンプリ

ング, もう半分を記載及び保存用にした. 行った検討は, 半裁直後の記載, 軟X線写真撮影, 剥ぎ取り試料に基づく堆積物の記載, Multi-Sensor Core Logger (MSCL: Geotek社)によるγ線透過率及び帯磁率, 土色計によるL*a*b*表色系の測定, 堆積物の物性の測定(泥分含有率, 湿潤・乾燥かさ密度, 含水比など), 放射性炭素年代測定である. 以下にそれぞれを説明する.

4.1 コアの記載

コアの記載は, コア半裁直後の一次記載, 半裁直後の写真, 軟X線写真, 剥ぎ取り試料をもとに, 堆積構造, 粒度, 生痕, 色などに注目して行った.

一次記載は, 半裁直後のまだ湿潤状態のコアの表面をクリーニングし, 観察を行った. 基本的に1/4スケールでスケッチを行い, その後軟X線写真や剥ぎ取り試料を参考に再記載した.

軟X線写真撮影は, 有田・中村(1981), 有田(1983)の方法に従い, 内寸で厚さ1.0cm, 幅6.0cm, 長さ25.0cmもしくは20.0cmの透明アクリルケースを用いて堆積物試料を採取し, 試料が乾かないうちに撮影を行った. 撮影時のX線の強度条件は管電圧50kvp, 電流3~4mA, 照射時間40秒程度を目安とした. 増感紙及

び印画紙を入れた撮影ケースの上にサンプルを置いてその陰画を撮影した。

剥ぎ取り試料の作成は、コアがある程度乾いたあと、グラウト剤であるOH-1A(東邦化学工業株式会社)を水に対して約5~10%に溶いたものを直接コアにかけ、裏打ちとして綿布をあて、数分して半固結状態になったあとコアから引き剥がし、乾燥させた。

4.2 密度

密度は、MSCLでコアチューブを半裁する前の γ 線透過率として、また、連続採取された7ccのポリカーボネイトキューブに詰めて得られた試料でそれぞれ求めた。

MSCLを用いると、採取された堆積物がコアチューブに入った状態のまま非破壊でさまざまな測定ができる。MSCLはコアの最大径を切る断面で線源とディテクターが対になっており、コアチューブを深度方向に移動させることで連続的にデータを得ることができる。 γ 線源には ^{137}Ce (370 Bq)が用いられ、計測条件は、測定間隔1 cm、各点の測定時間は10秒間である。 γ 線透過率はほぼ試料の密度を示すと考えられるので(Tittman and Wahl, 1965; Evans, 1965)、 γ 線透過率から湿潤密度への変換は同様な条件で計測されたアルミ板を用いて作成されたカリブレーションカーブを利用できる。カリブレーションした結果からは、12,000 cpsで1.03 g/cm³、10,000 cpsで1.30 g/cm³、8,000 cpsで1.62 g/cm³、6,000 cpsで2.04 g/cm³程度の値を示す。コアのつなぎ目部分を除いた有効な総測定個数は約5,200点であり、平均すると1.2 cmに1点の間隔で測定されたことになる。

キューブ試料(7cc)は、コア半裁直後に連続的にサンプリングされ、その直後の湿潤重量と、60℃で2日間乾燥させた後の重量をそれぞれ測定した。キューブ試料の容量で重量を割ったものがそれぞれ湿潤密度、乾燥密度となる。湿潤密度は2,222点、乾燥密度は1,078点で計測されている。

4.3 帯磁率(初磁化率)

帯磁率の測定は、MSCL及び連続採取されたキューブ試料を用いた。

MSCLの帯磁率は、コアチューブがちょうど通る大きさのループセンサー(125 mm径)を用い、1 cm間隔で測定した。 γ 線透過率の測定と同様に、コアを深度方向に移動させることで連続的なデータを得ることができる。MSCLでは、約5,200点で計測した。

キューブ試料を用いての帯磁率は、Bartington社製MS-2型帯磁率計を用いて測定した。測定には、乾燥させたキューブ試料を用いた。総測定個数は1,078点である。

4.4 色調

色調は、半裁直後のコアに対し、デジタル土色計(SPAD-503: コニカミノルタホールディングス株式会社)を用い、5 cmごとにL*a*b*表色系による測定を行った。実際の測定は、透明なラップを掛けた白色補正板で値を補正しながら、同じくラップを掛けたコアの切断面に土色計を軽く押し付けて行った。総測定個数は1,016点である。

4.5 泥分含有率(%)

泥分含有率は、連続サンプリングされたキューブ試料及び5 cmごとに連続採取された保存用試料を用い、深度20 cmごとに1個の割合で求めた。実際の手順では、乾燥後の試料について、63 μ mの篩を用いて細粒分(シルト及び粘土)を洗い流し、その残渣を乾燥させたものの重量と、もとの乾燥試料との重量から求めた。総測定個数は243点である。

4.6 含水比(%)

含水比は、連続的に採取されたキューブ試料を用いて、その湿潤密度と乾燥密度とから計算して求めた。総測定個数は1,078点である。

4.7 N値

N値は、GS-SK-1Aのすぐそばで実施された標準貫入試験ボーリングGS-SK-1Nで求められた(第2図)。N値を求めるための標準貫入試験は、基本的にJIS A-1219に従っている。

4.8 放射性炭素年代測定

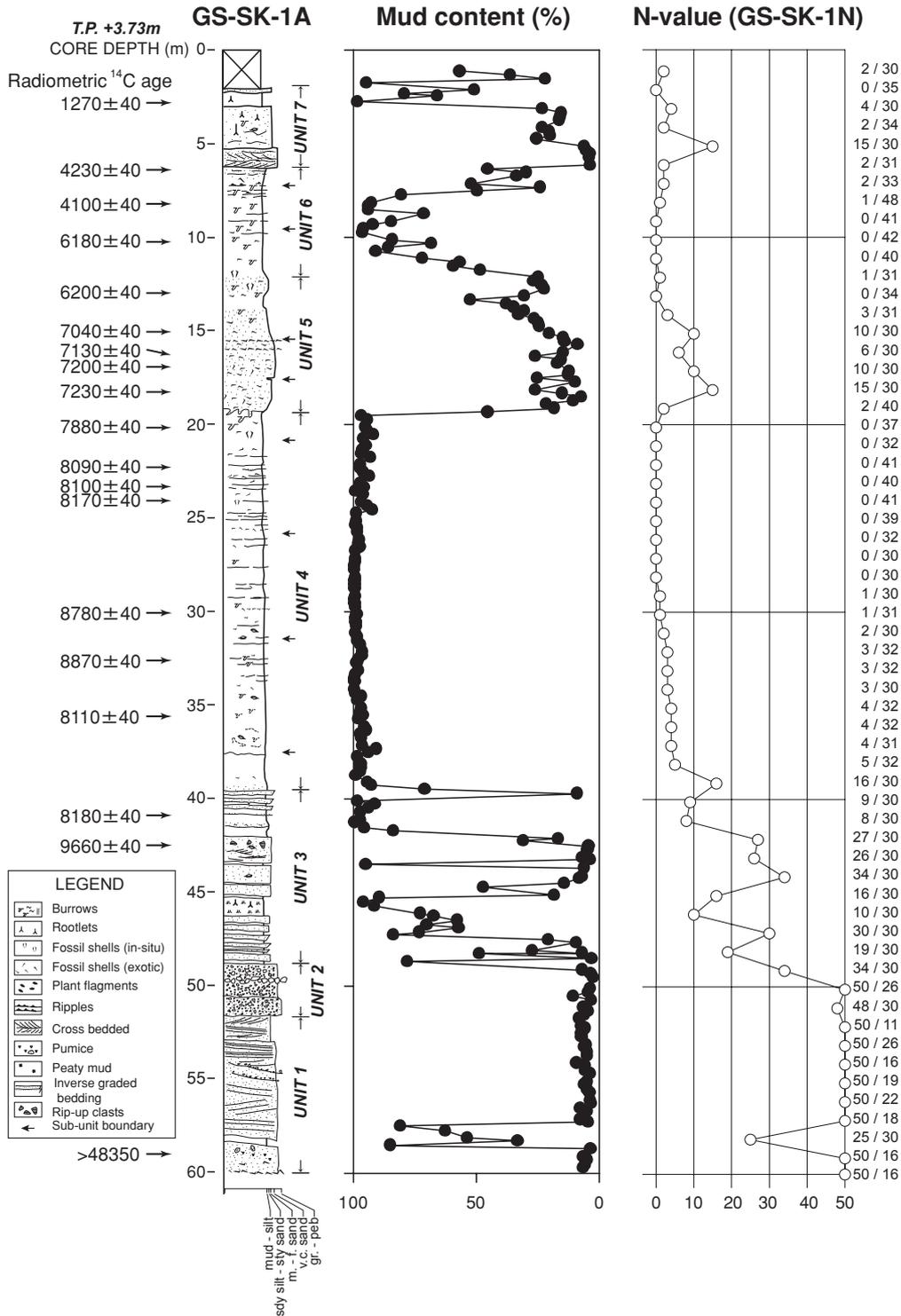
年代測定用試料には、主として海生・汽水生の貝化石、これを含まないところでは木片や植物根を用い、AMSによる放射性炭素年代の測定をBeta Analytic社に依頼した。試料は可能な限り現地性の特徴を示すもので、かつ貝化石に関しては種が同定されるものを中心に選び出した。

5. コアの観察・測定結果

以下、4章にあげた検討項目ごとに詳細を述べる。

5.1 層相

GS-SK-1A コアは層相によって、下位から大きく砂層・砂泥互層(Unit 1)、礫層(Unit 2)、砂泥互層(Unit 3)、泥層(Unit 4)、シルト質砂層(Unit 5)、泥層(Unit 6)、砂層(Unit 7)に分けることができる(第2図)。全体的には上方細粒化し、最上部で再び粗粒化する傾向がある。本コアから得られた貝化石については、中島ほか(2004)の結果に基づいてその概要を記述する。ま



第2図 GS-SK-1A コアの柱状図, 堆積相区分, 泥分含有率, 放射性炭素年代値及び GS-SK-1N で得られた N 値。

Fig. 2 Sedimentary column, sedimentary units, mud contents, and radiocarbon dates as Radiometric ¹⁴C age from the GS-SK-1A core. N-values are obtained from borehole of GS-SK-1N neighbor the core site. Details are in text.

た,本文中での放射性炭素年代値は,すべてRadiometric ¹⁴C age で示し,第1表に深度,標高,用いたサンプルの種類,貝化石種, $\delta^{13}\text{C}$, Radiometric ¹⁴C age (yrBP), conventional ¹⁴C age (yrBP), calibrated ¹⁴C age (cal.yrBP)及びサンプルコードを表にしている。以

下にそれぞれ説明する。

砂層・砂泥互層 (Unit 1)

深度: 59.9 ~ 51.8 m

記載: 下位から貝化石を多く含む砂層 (深度59.9~59.0

Depth in core (m)	Elevation (m)	Material	Species	$\delta^{13}\text{C}$ (permil)	Radiometric ^{14}C age		Conventional ^{14}C age		Calibrated ^{14}C age		Sample code (Beta-#)
					(yr BP)	(yr BP)	(yr BP)	(yr BP)	Intercepts (cal. yr BP)	One sigma range	
-3.25	0.48	Plant material*	Rootlet ?	-27.2	1270±40	1230±40	1172	1256 - 1071	177911		
-6.89	-3.16	Shell	<i>Crassostrea gigas</i> (Thunberg)	-0.4	4230±40	4630±40	4832	4858 - 4813	177912		
-8.28	-4.55	Shell	unknown	-0.4	4100±40	4500±40	4700	4800 - 4610	183665		
-10.22	-6.49	Shell*	<i>Dosinella angulosa</i> (Philippi)	-0.3	6180±40	6590±40	7142	7174 - 7041	177913		
-13.42	-9.69	Shell	<i>Solen krusenstermii</i> Schrenck	-0.8	6200±40	6600±40	7148	7185 - 7080	177914		
-15.10	-11.37	Shell	<i>Cadella delta</i> (Yokoyama) / fragments of bivalve	1.0	7040±40	7470±40	7930	7950 - 7870	183666		
-17.05	-13.32	Shell	<i>Crassostrea cf. gigas</i> (Thunberg)	-0.2	7130±40	7540±40	7970	8010 - 7940	183667		
-17.20	-13.47	Shell	<i>Crassostrea gigas</i> (Thunberg)	-0.2	7200±40	7610±40	8036	8111 - 7996	177915		
-18.65	-14.92	Shell	unknown (bivalve)	-1.0	7230±40	7620±40	8050	8120 - 8010	183668		
-20.55	-16.82	Shell*	<i>Potamocorbula</i> sp.	-0.5	7880±40	8280±40	8822	8889 - 8744	177916		
-22.55	-18.82	Shell*	<i>Potamocorbula</i> sp.	-1.1	8090±40	8480±40	8950	8995 - 8903	177917		
-23.80	-20.07	Shell*	<i>Potamocorbula</i> sp.	-1.2	8100±40	8490±40	8955	9000 - 8909	177918		
-24.41	-20.68	Shell	unknown	-3.4	8170±40	8520±40	8970	9261 - 8925	177919		
-30.52	-26.79	Wood	unknown	-28.3	8780±40	8730±40	9697	9886 - 9564	177921		
-32.75	-29.02	Shell	<i>Corbicula japonica</i> Prime	-7.0	8870±40	9170±40	9820	9922 - 9620	177922		
-36.05	-32.32	Shell	<i>Potamocorbula</i> sp.	-1.5	8110±40	8500±40	8960	9005 - 8914	177923		
-41.50	-37.77	Shell	<i>Potamocorbula</i> sp.	-1.8	8180±40	8560±40	8991	9267 - 8946	177924		
-43.15	-39.42	Wood	unknown	-27.2	9660±40	9620±40	11089, 10935, 10926, 10923, 10908, 10897, 10892	11157 - 10788	177925		
-58.72	-54.99	Wood	unknown	-27.9	>48400	>48350			180986		

calibration for carbonate: delta R=0, marine carbon=100% *: in-situ material

第1表 GS-SK-1A コアから得られた放射性炭素年代値。暦年は、CALIB 4.3 (Stuiver *et al.*, 1998) によって求められた。

Table 1 Summary of radiocarbon dates obtained from the GS-SK-1A core. Calibrated ^{14}C ages were calculated using CALIB 4.3 (Stuiver *et al.*, 1998).

m), 多くの軽石を含む砂層(深度 58.9 ~ 58.5 m), 砂泥互層(深度 58.5 ~ 57.3 m), 砂層(深度 57.3 ~ 51.8 m)の順で重なる。砂層中には全体的に斜交層理及び平行葉理が発達する(第 2 図)。

貝化石を含む砂層は中粒 - 細粒砂からなり, 平行葉理や斜交層理(第 3 図 A)及び小規模なカットアンドフィルが認められる。深度 59.9 m にはキララガイ, ヤツシロガイ, カガミガイ, マテガイ類, タマキガイ類などの貝化石片がラグ状に密集している(中島ほか, 2004)。

軽石を多く含む層は, 貝化石を含む砂層の直上に重なり, 粗粒 - 中粒砂からなる。極粗粒 - 粗粒砂サイズ, 最大で 3 cm の直径を持つ軽石片を多く含む。コアの状態が悪く, 堆積構造は不明瞭である。

砂泥互層は, 厚さ 10 ~ 40 cm で中粒 - 細粒シルトに, 厚さ 0.5 ~ 1 m の細粒 - 極細粒のシルト質砂が挟在する。全体的に良く固結している。砂層中には, 斜交層理が発達する。

最上部の砂層は下位の互層をやや削剥的に覆う。極粗粒砂 - 中粒砂に, 極粗粒砂サイズの軽石片や貝化石片が散点的に混じる。全体的に上方細粒化し, 平板型及びトラフ型斜交層理が発達する。斜交層理は層理面に対し 20 度以下の角度を持つことが多い。

深度 58.7 m の木片から得られた放射性炭素年代値は, 48,400 yrBP を超える値を示す。

解釈: 年代値や深度から, このユニットは沖積層の下位にある下総層群相当層であると考えられる。得られたコアはそれほど長くないこと, この周辺の下総層群の実体が明らかでないことなどから, その地層名や堆積環境は不明である。

礫層 (Unit 2)

深度: 51.8 ~ 48.9 m

記載: Unit 1 の砂層を削剥的に覆い, 下位とは粒度, 色などが明瞭な違いを持つ。礫層の基質は細礫 - 極粗粒砂で, その中に円 - 亜円の中 - 大礫を含む(第 3 図 B)。基質の粒度は下位ほど粗いが, 大きな礫は上位に多く挟まれる。深度 50.7 ~ 50.9 m と 49.6 ~ 49.7 m では, 直径 1 ~ 2 cm または 3 ~ 4 cm の礫が多く含まれる(第 2 図)。

解釈: 主として礫からなり, 下位の下総層群相当層を削剥して覆うこと, 上位を氾濫原の堆積物が覆うことから, 河川チャネルを充填する堆積物であると考えられる。厚さが比較的薄いため, チャネルとしては浅いものであるか, 主要なチャネルから外れている可能性もあるが, 採取されたコアの径が小さいこと, 堆積構造は破壊されていること, 年代値が得られていないことから詳細は不明である。

砂泥互層 (Unit 3)

深度: 48.9 ~ 39.6 m

記載: 下位の Unit 2 を整合的に覆う砂泥互層からなる(第 2 図)。

砂泥互層のうち, 砂層は厚さ 10 ~ 20 cm で細粒 - 極細粒砂からなり, 逆級化するものが多い(第 3 図 C)。深度約 41.0 ~ 45.0 m の間には, 厚さ 1 m 程度の砂層が 2 枚挟在される。また, 砂層は炭質物を含むもの, 小さなリップル葉理が発達するもの, 上部が液状化しコンポルト葉理のあるものが多い。厚さ 1 m 程度の砂層は下部に平行葉理及びリップル葉理が発達し, 上部ではシルトのリップアップ・クラストを含む塊状の砂層からなる。泥層は粗 - 中粒シルトからなり, 塊状であることが多く, しばしば炭質物が含まれる。

深度 41.5 m の泥層には, ヌマコダキガイ類が認められる(中島ほか, 2004)が, 上位及び下位が塊状の泥層であるにも関わらず貝化石を含む泥層だけはスランプ状に乱れており, 掘削作業中に上位の孔壁の堆積物がまじったものと推定される。深度 45.4 ~ 46.3 m には, 泥炭層が認められる。

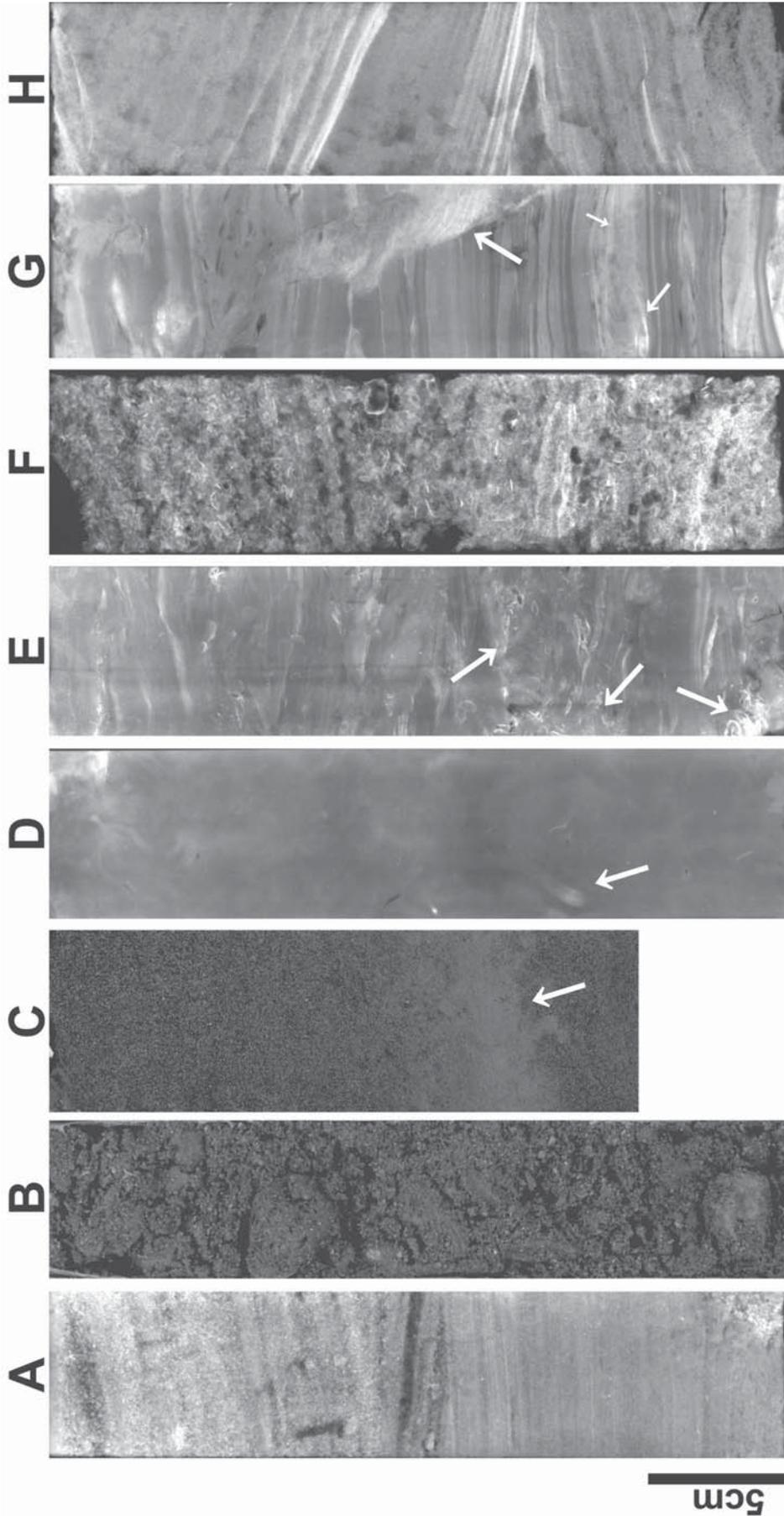
木片及びヌマコダキガイ類の貝殻片から, それぞれ 9,660 ± 40 yrBP (深度 43.2 m), 8,180 ± 40 yrBP (深度 41.5 m) の放射性炭素年代値が得られている。後者の年代値は, 上に記述したように孔壁の落下物の可能性が高いことから, 堆積年代値としては採用しない。

解釈: 挟在される多くの砂層は逆級化しており, 洪水起源の自然堤防の堆積物であると考えられる(伊勢屋・増田, 1985; 増田・伊勢屋, 1985)。一方泥炭層は氾濫原や塩水湿地などにしばしば認められるとされる(Dalrymple, 1992; Collinson, 1996)。厚い砂層はほとんど下位を削り込まないが, シルトのリップアップクラストを含んでいたり, トラクション及びサスペンションから堆積した特徴を示すことから, クレバス・スプレー堆積物(Galloway, 1981; Reading and Collinson, 1996)もしくはチャネル充填堆積物の可能性がある。これらの事実から, Unit 3 は河川の周辺の自然堤防から氾濫原の堆積物であることが示唆される。

泥層 (Unit 4)

深度: 39.6 ~ 19.3 m

記載: 全体的に中粒 - 細粒シルトからなる泥層が卓越し, 比較的単調であるが, 堆積構造, 粒度, 貝化石の分布などから, 最下部, 下部, 中部, 上部, 最上部の 5 つに分けることができる(第 2 図)。これらはそれぞれ下位から, 塊状泥層(深度 39.6 ~ 37.5 m), 不明瞭な生痕を含む泥層(深度 37.5 ~ 32.0 m), 塊状泥層(深度 32.0 ~ 26.4 m), 薄い砂層を挟む泥層(深度 26.4 ~ 21.6 m), 巣穴状生痕を含む泥層(深度 21.6 ~ 19.3 m)と重なる。



第3図 GS-SK-1Aコアの写真(A, C)及び軟X線写真(B, D-H). 軟X線写真はおよそ相対的な堆積物の密度を示し、白色ほど密度が高い陰画である。A(深度55.60～55.90 m): Unit 1に見られる斜交層理。B(深度49.25～49.00 m): Unit 2の礫質砂層。C(深度47.00～47.20 m): Unit 3に認められる逆級化する砂層。矢印は逆級化ユニットの底部を示している。D(深度36.65～36.40 m): Unit 4の塊状の泥層。矢印は巣穴状生痕と思われれる構造。E(深度22.65～22.40 m): Unit 4における極細粒砂層の挟在する泥層。矢印はヌマコダキガイがパッチ状もしくは薄層状に含まれている場所を示す。F(深度16.90～16.65 m): Unit 5に認められる礫質砂層中の斜交層理。G(深度7.65～6.90 m): Unit 6に認められるトラフ-板状斜交層理のある砂層。

Fig. 3 Selected photographs (B, C) and radiographs (A, D-H) from the GS-SK-1A core. Radiographs approximately show relative density of sediments. The density increases from gray to white. A (-55.60 to -55.90 m): cross bedding of sand in unit 1. B (-49.25 to -49.00 m): pebbly sand in unit 2. C (-47.20 to -47.00 m): inversely graded sand in Unit 3. An arrow shows base of an inversely graded unit. D (-36.65 to -36.40 m): massive mud in Unit 4. An arrow shows a burrow-like structure. E (-22.65 to -22.40 m): mud interbedded by thin very fine sand in Unit 4. Arrows indicate patches or layers of *Potamocorbula* sp. F (-16.90 to -16.65 m): cross-bedded pebbly sand in Unit 5. G (-7.65 to -6.90 m): thinly alternated mud and sand in Unit 6. Arrows indicate a burrow filled with fine sand (large arrow), and a reactivation surface (small arrow). H (-5.88 to -5.63 m): trough to planer-cross bedded fine sand in Unit 7.

最下部の塊状泥層は,上位の泥層よりも褐色が強く,有機質である。上位の泥層はやや灰色がかっているため,境界が明瞭である。

下部の不明瞭な生痕を含む泥層は,下位の塊状泥層に比べやや灰色がかり,その境界は色の違いで明瞭である。不明瞭な巣穴状生痕が全体に卓越するが(第3図D),上位になるほど生痕が少なくなるとともに砂層の挟在及び貝化石の混入が増える。貝化石はヤマトシジミが多く含まれている。

中部の塊状泥層は,極細粒砂及びまれに貝化石片を挟む。明瞭な生痕及び生物擾乱は認められず,軟X線写真では弱く葉理をなしていることが多い。

上部の薄い砂層を挟む泥層は,層厚1 cm以下の極細粒砂層を多く挟在する(第3図E)。また,多くの層準で合弁及び離弁のヌマコダキガイ類が層状及びパッチ状に密集している(第3図E)。

最上部の巣穴状生痕を含む泥層は塊状で,合弁及び離弁のヌマコダキガイ類を多く含む。巣穴状生痕は直径2~3 cmのものが多く(第3図D),内部には細粒・極細粒砂が充填されていることが多い。全体的に上部ほどこの生痕を含む。

深度約32 mまでは,合弁のヤマトシジミ,ヌマコダキガイ類,カワアイなどが産出する。その上位になると,ヌマコダキガイ類が層状あるいはパッチ状に密集して産出するようになる。ここでは合弁殻を多く含む層準もいくつか認められるが基本的に離弁のものも多く,合弁であっても生息姿勢を示さない(中島ほか,2004)。

ヌマコダキガイ類,ヤマトシジミ,木片などから得られた放射性炭素年代値は,下位から8,110±40 yrBP(深度36.1 m),8,870±40 yrBP(深度32.8 m),8,780±40 yrBP(深度30.5 m),8,170±40 yrBP(深度24.4 m),8,100±40 yrBP(深度23.8 m),8,090±40 yrBP(深度22.6 m),7,880±40 yrBP(深度20.6 m)を示す。このうち,深度36.1 mの貝化石は,深度36.0~36.9 mのコアの上下の層相と合わず,下位とは隙間が見られる泥層の中に含まれていることから,孔壁の落下物であった可能性が高い。

解釈:全体的に塊状の泥岩が卓越しているが,堆積物や化石種の垂直変化から見ると,最下部の泥炭質のシルトからヤマトシジミが卓越する泥層に急変し,更に薄い砂層を多く挟在し,ヌマコダキガイ類を多く含む泥層へと移り変わっている。Unit 4に含まれる貝化石は汽水生種であり,下部には塩分耐性の小さなヤマトシジミ,上部ではより大きなヌマコダキガイ類が卓越することから,潮間・潮下帯内での,より塩分が高い環境への変遷が推定される(中島ほか,2004)。上記の事実から推定される堆積環境は塩水湿地から泥質干潟であるが,粗粒堆積物や潮汐の営力を示す堆積物を含

まないことから,外洋からはやや閉じられた環境が考えられる。同様にGS-SK-1より2 km程度南に位置する埼玉県三郷市に掘削されたMS-3ボーリングコア(遠藤ほか,1992)でも,およそ深度30 m(標高-28 m)以深は有孔虫が認められないことから,完全に海が入っていないか,もしくは河川の影響が強かったことが主張されている点(関本,1992)もこの環境を支持する。

シルト質砂層 (Unit 5)

深度:19.3~12.0 m

記載:下位のUnit 4から漸移的に変化し,下部のシルト質砂層(深度19.3~17.1 m),中部の細礫・貝化石片を含む粗粒砂層(深度17.1~15.9 m),上部の生痕の卓越するシルト質砂層・シルト層(深度15.9~12.0 m)と重なる。下位から一組の上方粗粒化・上方細粒化サクセッションをなす(第2図)。

下部は,シルト分を含む中粒・細粒砂からなり,ところどころに木片やシルトのリップアップ・クラストを含む。下位ほど淘汰が良い細粒砂でシルト分が少ない。砂層中には不明瞭な葉理が認められる。

中部は細礫・貝化石片及びシルトを含む粗粒・細粒砂からなり,淘汰が悪い。貝化石の多くは破片化しており,巣穴状生痕や不明瞭だが水平面とやや斜交する層構造も認められる。また,貝化石も層をなして産出する場合がある(第3図F)。

上部はシルト混じりの粗粒・中粒砂もしくは粗粒・中粒砂混じりのシルトからなる。生物擾乱及び巣穴状生痕が認められ,貝化石の混入も多い。生物擾乱が弱いところでは,しばしばパッチ状にシルト片が含まれる。更に上位になると生息姿勢を保ったフスマガイも含まれるようになる。

含有する貝類群集は,下部ではマガキ,バカガイなどが産出し,中・上部になるとクサビザラ,シマモツボ,マメクチベニ,ヒメカノコアサリなどの海生種の産出が増加する(中島ほか,2004)。中島ほか(2004)では,これらの群集組成と産状から潮下帯以深の砂底の環境であったと推測している。

このユニットからは,マガキから7,200±40 yrBP(深度17.2 m)と7,130±40 yrBP(深度17.05 m),クサビザラを含む貝化石片から7,040±40 yrBP(深度15.1 m),そしてエゾマテガイから,6,200±40 yrBP(深度13.4 m)の放射性炭素年代値が得られている。

解釈:下部の砂層は,下位の泥質干潟堆積物を覆い,生物擾乱及び斜交層理が認められること,上位に重なる砂層がより古水深の大きな潮下帯以深の砂底環境であることから,砂泥干潟・砂質干潟の堆積物(Dalrymple,1992)と対比できると考えられる。中部の砂層は細礫や破片化した異地性の貝化石片などを多く含み,これらが層構造をなすことから,ここでは潮流などの流れが

作用していた可能性があるが、堆積構造が不明瞭であること、空間分布が明らかでないことから、詳細な堆積環境の推定は難しい。おそらく、潮下帯の砂質干潟-砂州 (sand bar もしくは shoal) などがそれにあたるだろう。上部では海生種の貝化石が増加し (中島ほか, 2004), 生息姿勢の貝化石も含まれるようになるので、上位の Unit 6 の内湾的な環境へ徐々に移行していったことが示唆される。

泥層 (Unit 6)

深度: 12.0 ~ 6.3 m

記載: 下位の Unit 5 から漸移的に移り変わり, Unit 7 に削剥されて覆われる。下位から細粒砂混じりのシルト (深度 12.0 ~ 9.7 m), 中粒-細粒シルト (深度 9.7 ~ 7.9 m), 中粒-細粒シルトと細粒-極細粒砂の細互層 (深度 7.9 ~ 6.3 m) と重なり, 一組の上方細粒化・上方粗粒化サクセッションを示す (第 2 図)。

下部の細粒砂混じりのシルトは強い生物擾乱が認められ, 所々砂がパッチ状に散るが, 明瞭な堆積構造は認められない。

中部の中粒-細粒シルトは下部に比べて砂層の挟在や生物擾乱が少なくなる。軟 X 線写真には, 不明瞭な葉理が認められることもある。

上部の細互層はリップル葉理を含む薄い砂層を挟在するようになるとともに, 直径 2 cm 程度の幅をもつ巣穴状生痕が発達するようになる (第 3 図 G)。深度 7.8 m 付近のリップル葉理は 2 つの流向を示す場合や reactivation surface (Dalrymple, 1992) を持つ場合がある。砂層中及び巣穴状生痕中には, しばしば貝化石片が認められる。上位のユニットとの境界付近になると, 生物擾乱によって堆積構造は破壊されている。

全体的にウラカガミガイ, ヒメカノコアサリ, マメウラシマガイという内湾泥底によくみられる種が認められた (中島ほか, 2004)。

このユニットでは, ウラカガミガイから 6,180 ± 40 yrBP (深度 10.2 m), 種が特定できなかった貝化石から 4,100 ± 40 yrBP (深度 8.3 m), マガキから 4,230 ± 40 yrBP (深度 6.9 m) の放射性炭素年代値が得られている。解釈: この泥層は下位の潮下帯の砂質干潟-砂州堆積物を覆い, 内湾泥底の貝化石を産すること, 強い生物擾乱の認められる泥層からなることから, 静穏な内湾性の堆積物であると考えられる。一方, 上位になると潮汐の影響を示すと考えられる, 2 つの流向をもつリップル葉理を含む砂層を挟在するという事は, 潮汐が作用する程度に浅海化していったことが示唆される。本ユニット下部の上方細粒化は下位の砂質干潟-砂州堆積物がより深い堆積環境もしくは静穏な環境へと移行したことを意味しており, ユニット中・上部に認められる上方粗粒化は, 内湾泥底のプロデルタから

デルタフロントへの移行 (Scruton, 1960; Coleman; 1981; Reading and Collinson, 1996) を示していると考えられる。

砂層 (Unit 7)

深度: 6.3 ~ 2.4 m

記載: Unit 7 の砂層は, 下位を削剥しながら覆い, 最下部の極粗粒-粗粒砂から, 最上部の中粒-細粒砂まで上方細粒化する。深度 4.5 m 以浅では, 植物根が卓越する (第 2 図)。

下部 (深度 6.3 ~ 5.0 m) は板状斜交層理が発達し (第 3 図 H), 上部 (深度 5.0 ~ 2.4 m) になるとややシルト分を多く含むようになり, かつ炭質物片も多く含むようになる。上部では堆積構造がはっきりしない。最上部は中粒-細粒シルトになる。

このユニットからは, 植物根から 1,270 ± 40 yrBP (深度 3.25 m) の放射性炭素年代値が得られている。解釈: 最下部に削剥面をもち, 全体的に細粒化することから, 下部は浅い河川チャネル充填堆積物 (Miall, 1992), 上部はシルトが卓越し, 植物根を含むようになることから氾濫原の堆積物であると考えられる。

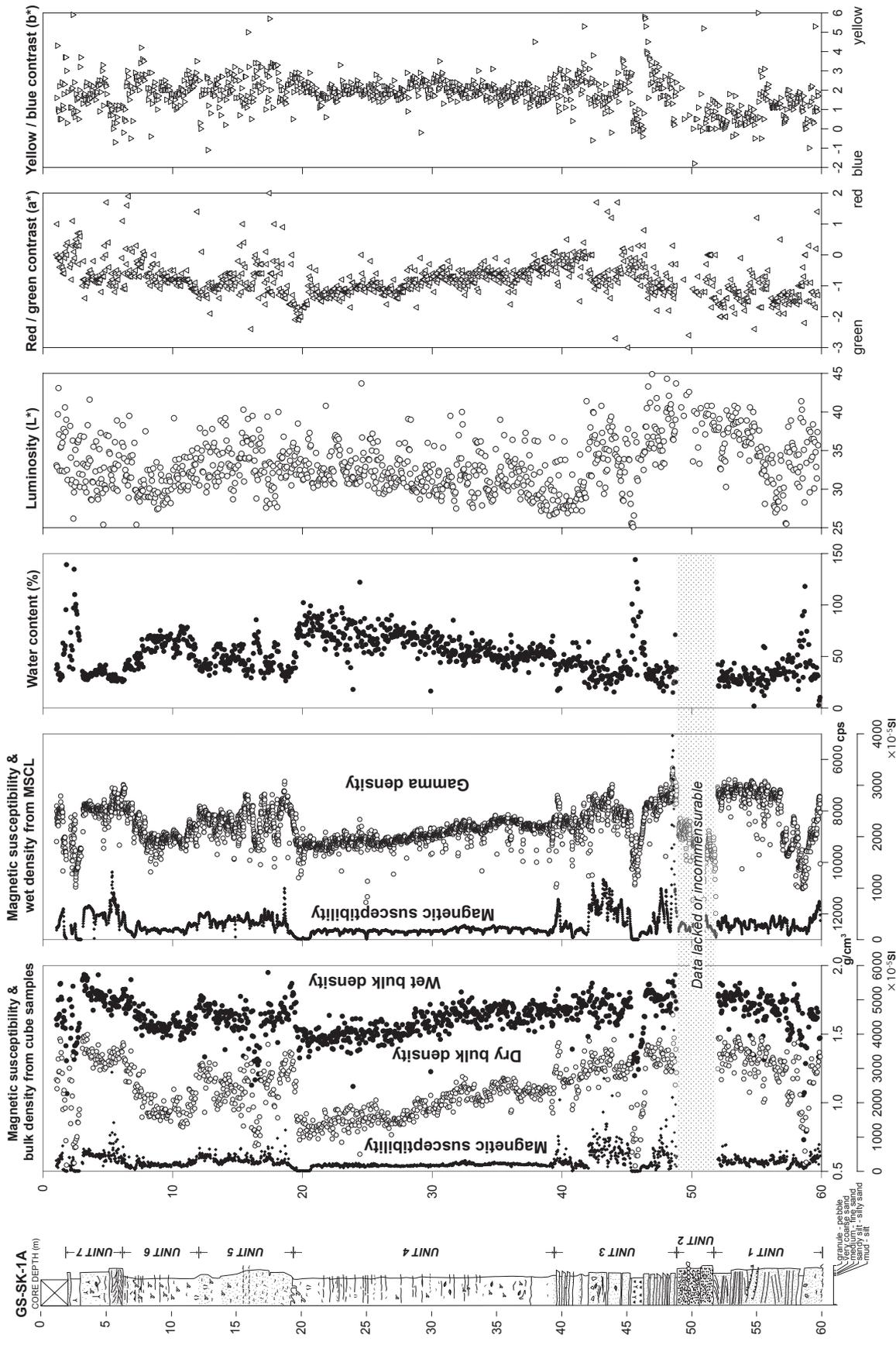
5.2 密度

湿潤密度は MSCL 及びキューブ試料から, 乾燥かさ密度はキューブ試料で測定されたものを第 4 図に示した。なお, Unit 2 の礫層は, この部分のみ細い径のコアパックで採取されたため全体的に値が小さく, 上位及び下位と単純に比較はできない。同層準では, キューブ試料も採取できていないので, その値は得られていない。

湿潤密度は, MSCL から得られた値及びキューブ試料から得られた値の両者ともに, Unit 1 から Unit 4, Unit 5 から Unit 6 の中部, Unit 7 の上方細粒化に対応して密度が低下する。一方, Unit 6 の中央部から上部の上方粗粒化のそれに対応して増加する傾向も明瞭に認められる。MSCL において, 砂層を含む層準ではしばしば短い周期の密度変化が認められるが, これは砂層内の粒度変化やしばしば挟在される泥層のため値が揺らいでいるものと判断できる。また, 下総層群相当層である Unit 1 の砂層は, 上位の Unit 3 で認められる砂層よりもやや高いか同程度の密度を示すが, 挟在される泥層では有意に低い値を示す。これは局所的な含水比の高い層準に対応する。MSCL から得られた値に対し, キューブ試料から得られた湿潤密度の値はばらつくように思われるが, これは試料採取時にうまくサンプルを得られなかったことが原因の誤差によるものが大きい。

キューブ試料から得られた乾燥かさ密度は, 湿潤密度とほぼ同じ変化傾向を示す。Unit 1 ~ Unit 3 の砂層,

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 (石原ほか)



第4図 GS-SK-1A コアから得られた堆積物物性 (帯磁率, 含水比, 明度, 色相). これらの物性は堆積相ユニットに対応して層序的に変化する. Unit 2 部の密度, 帯磁率, 含水比の値は, この部分だけ細かいコアチューブで採取されたため, データが得られていないか, 比較できない.

Fig. 4 Sediment properties (magnetic susceptibilities, bulk densities, water contents, luminosities and color contrasts) of the GS-SK-1A core. The properties vary stratigraphically corresponding to sedimentary facies units. Densities, magnetic susceptibilities, and water contents data of Unit 2, interval of pebbly sand, are lacked or incommensurable, because the interval is relatively narrow core tube. Details are in text.

砂礫層、砂泥互層はほぼ 1.3 g/cm^3 程度であり、安定している。一方、Unit 4の泥層は下部の 1.2 g/cm^3 から上部の $0.8 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$ へとしだいに密度を減じる。Unit 7の最上部の試料を除き、深度20 m付近の密度が最も低い。そしてUnit 5及びUnit 7の砂層になると 1.0 g/cm^3 以上の値を示すようになる。この変化は含水比と逆相関しており、密度の低い部分は多くの水を含むことがわかる。

湿潤・乾燥かさ密度両者ともに、ある程度深くなると、層相区分との対応が悪くなる(第4図)。層相の変化が少ないため特定できないが、およそ深度20~30 mより深いところでは、密度のみから層相を特定することは難しい。例えばUnit 4とUnit 3の境界は、密度そのものの値よりもその値の集中度やばらつきで層相の違いを見て取れる傾向がある。

5.3 帯磁率(初磁化率)

MSCL及びキューブ試料から得られた帯磁率は、ほぼ同じ変化傾向を示す(第4図)。基本的に砂質の層準で高い値を示し、泥質及び泥炭質な層準で低い値を示す。深度47 m付近に認められる高い値は、砂鉄が特に濃集している層準であり、その他の小さなピークは同じく磁性鉱物を多く含むと考えられる層準である。特に、Unit 3の砂層では、Unit 1, 5, 7に認められる砂層よりも優位に大きな値を示す。一方で、Unit 3中の泥炭層及びUnit 4中の深度20 m前後は著しく値が低い。深度50 m前後に認められる礫層(Unit 2)は、キューブ試料でサンプリングできない上、この部分のみ細い径のコアバックで採取されたため、MSCLでも全体的に値が小さい。なお、MSCLの帯磁率の変化に見られる規則的でパルス状の値の減衰は、コアの継ぎ目に当たる場所である。

5.4 色調

$L^*a^*b^*$ 表色系で計測された色調の層序的变化のうち、相対的な明度である L^* 、色相 a^* (緑-赤)、色相 b^* (青-黄色)の変化はそれぞれ層相変化に関連しているのが認められる(第4図)。基本的には色相の値は低く、灰色系統を示すことがわかる。しかしながら、層相区分と色調の個々の値そのものが対応するというわけではない。

L^* は25~45の値を示し、比較的明瞭に層相と対応する。基本的に砂質な部分は明るめで、泥質な部分は暗めの傾向がある。下部の砂質-礫質なUnit 1~Unit 3では、やや明るめで値がばらつき、泥層からなるUnit 4は最下部が最も暗く、上位に行くにしたがって明るい色を呈する。Unit 4より上位は層相との対応ははっきりとしなくなるが、泥質なUnit 6では砂質なUnit 5及びUnit 7よりは値がばらつかない。なお、 L^* 値にお

いて、最低値付近に値が集中し、より高い値ではばらつきように見えるのは、計測時に光が外部から入ることによる誤差である。

a^* は-2~1を示し、層相境界で値の変化傾向が変わる。下位の砂層-砂礫層であるUnit 1及びUnit 2では値がばらつき、層相と対応する明瞭な変化傾向を示さないが、Unit 3から上位は値が比較的集中する。Unit 4の泥層は上位に行くにしたがって赤から緑にシフトし、Unit 4/Unit 5境界より上位では逆に緑から赤にシフトするのが読み取れる。つまり、層相区分と変曲点が一致する傾向がある。

b^* は全体的に値が1~2に集中し、明瞭な変化傾向は認められない。しかし、層相によって値のばらつきの度合いが変化するのが読み取れる。すなわち、砂質なUnit 1, Unit 2, Unit 3, Unit 5, Unit 7では値のばらつきが大きく、泥質なUnit 4及びUnit 6ではばらつきが少ない。

5.5 泥分含有率

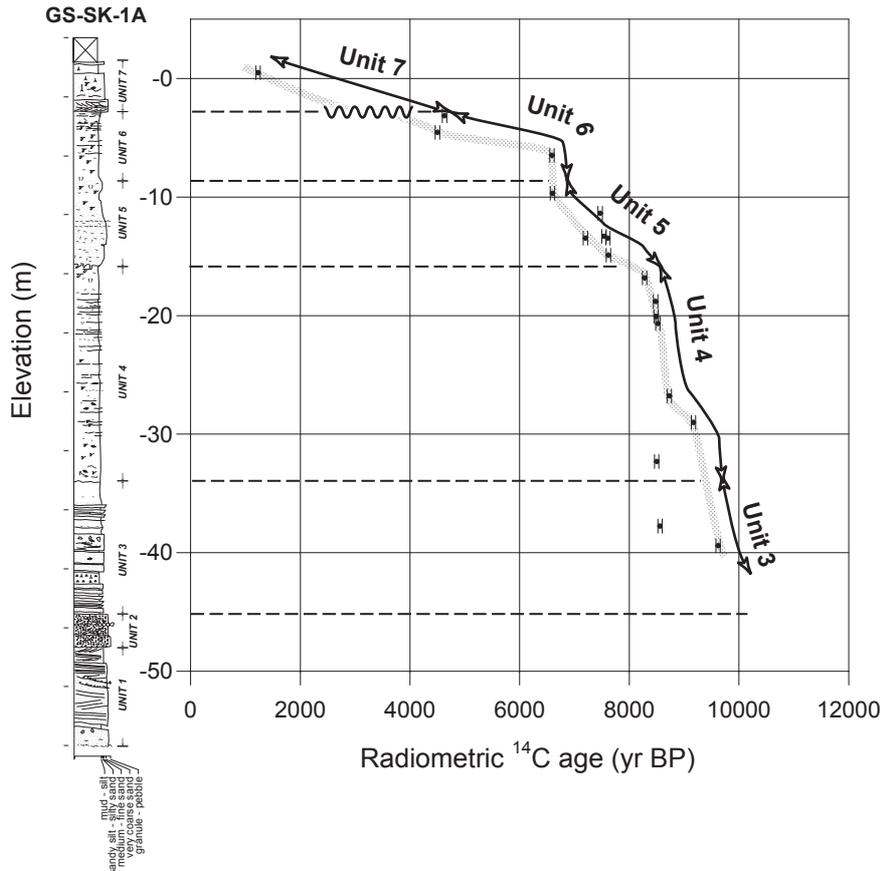
泥分含有率は、層相やN値と良く対応したトレンドを示す(第2図)。すなわち、主として砂層及び砂礫層からなるUnit 1, Unit 2などではほとんど泥を含まず、厚い泥層からなるUnit 4は逆にほとんど砂を含まない。Unit 5からUnit 6下部にかけては、N値や層相、乾燥かさ密度や湿潤かさ密度の変化にも認められる上方細粒化が明瞭である。

5.6 含水比

キューブ試料から得られた含水比はおよそ20~90%を示し、乾燥かさ密度と明瞭な逆相関の関係にある(第4図)。すなわち、密度の高い砂層及び礫層では含水比は50%未満と低く、泥層ではそれ以上を示すことがほとんどである。Unit 3からUnit 4にかけて、またUnit 5上部からUnit 6下部にかけてみられる上方細粒化サクセッションでは含水比が増加し、Unit 6中部からUnit 7下部にかけての上方粗粒化サクセッションでは低下している。砂層の含水比はどこでも安定している傾向があるのに対し、Unit 4の泥層は、下位から上位に向かって系統的に含水比を増すという特徴がある。また、Unit 7の泥層、Unit 3中の泥炭層は、含水比が100%を超えるときがある。含水比も密度の例と同様に、ある程度深くなると(およそ深度30 m以深)、値そのものと層相区分との対応は悪い(第4図)。

5.7 N値

GS-SK-1Nで得られたN値の層序的变化では、全体的に下位に向かって0~2程度から50以上へと増大する傾向と、柱状図や泥分含有率で示された粒度との関連が認められ(第4図)、比較的浅い深度では泥分含有



第5図 GS-SK-1A コアの柱状図と貝化石片及び木片から得られた放射性炭素年代値に基づく堆積曲線。

Fig. 5 Sedimentary column and sedimentary accumulation curve based on depth and measured radiocarbon dates of shells or woods from the GS-SK-1A core.

率 (第2図) が低いほど N 値は高くなる傾向がある。

Unit 1 の下総層群相当層は, N 値がほぼ 50 以上と高く最大で 130 (換算 N 値) を示し, BG に相当する Unit 2 は, およそ 50 程度の一般的な値を示す。Unit 3 の砂泥互層は, 砂層が 30 前後と高く, 泥層が 10 前後と低い。Unit 4 の泥層は, 深度 30 ~ 40 m までは深度が浅くなるにしたがって N 値 0 から 5 前後まで漸減し, それで浅では一定して 0 を示す。Unit 5 の砂層は N 値 10 前後を示し, 上位に向かい泥分含有率の増加に対応して漸減する。Unit 6 及び Unit 7 は砂層では N 値 10 前後, 泥層では 0 ~ 2 程度を示す。

5.8 放射性炭素年代測定

採取試料の標高と放射性炭素年代値とに基づいて, 堆積曲線 (増田, 2000; 埋積曲線: Saito, 1995; 斎藤, 1995) を描いた (第5図)。なお, 曲線を描くにあたって, サンプルングの問題に起因すると考えられる放射性炭素年代値を示す点を除いている。この堆積曲線からは, GS-SK-1 が Radiometric ^{14}C age でおよそ 10,000 yrBP ~ 4,100 yrBP の間, すなわち Unit 3 から Unit 6 まで

がほぼ整合的に連続して堆積したことが読み取れる。一方, 見た目の堆積速度の小さい Unit 6 から Unit 7 の区間は, その境界部分に削剥のあることが予測されるので, 実際の堆積速度はこの曲線よりも大きいと判断できる。

堆積曲線からは, Unit 3 から Unit 4 の最上部までは比較的堆積速度が速く (10 m/ky), Unit 5 以降は遅い (2.5 m/ky) ことが読み取れる。また同じ Unit 内でも, 堆積速度の速くなる区間と遅くなる区間が認められるときがある。例えば, 塊状の泥層が卓越し, 目立った層相変化の少ない Unit 6 内では堆積速度の大きな変化が認められ, 下部と中・上部での堆積様式の変化に対応している。

6. 考察

6-1 GS-SK-1 と中川低地の堆積環境の変遷

GS-SK-1 に見られた沖積層は, 下位から河川チャネル充填堆積物 (Unit 2), 自然堤防・氾濫原堆積物 (Unit 3), 塩水湿地 - 泥質干潟堆積物 (Unit 4), 砂質干潟 - 砂

州堆積物 (Unit 5), 内湾 (Unit 6), 河川チャネル充填堆積物 - 氾濫原堆積物 (Unit 7)と重なる。放射性炭素年代値は, これらの堆積物が 10,000 yrBP から 1,000 yrBPの間, 内部に削剥面を持ちながらもほぼ整合的に堆積していたことを示しており, 大局的にはこれらが一回の海進・海退で形成されたことが示唆される。

空間的な連続性がまだ明らかになっていないため予察的となるが, GS-SK-1 コアに基づく中川低地の堆積環境は次のように変化していったことが推測できる。すなわち, (1) 最終氷期の間に河川の下刻によって開析谷が形成される, (2) 開析谷の底に網状河川によって基底礫層が堆積し (Unit 2), その後の海水準の上昇に伴って氾濫原を持つ河川へと変化する (Unit 3), もしくは, 開析谷を埋積し, 蛇行河川が発達する (Unit 2, Unit 3), (3) 海岸線はGS-SK-1のサイトの近くにまで至り, 海岸線に近い環境の塩水湿地から泥質干潟が発達するようになる (9,000 ~ 8,000 yrBP : Unit 4), (4) 更に海進は進み, 潮間帯から潮下帯の砂質干潟を経て潮下帯の砂州 (内湾砂底)になった後, 一気に内湾が広がる (8,000 ~ 4,200 yrBP : Unit 5, Unit 6 下部), (5) 内湾は 6,000 年前以降のデルタの前進によって埋積されてゆき (Unit 6 中部・上部), GS-SK-1のサイト付近は河成平野へと変化する (Unit 7)。

これらの堆積相の埋没深度と放射性炭素年代値からは, 9,000 ~ 8,000 yrBPは海水準にあわせて干潟もしくは塩水湿地がキープアップしつつ発達した後, 縄文海進最盛期に内湾化し(ギブアップ), その後デルタの前進によって内湾が埋没していった過程を読み取ることができる。中島ほか (2004)は, GS-SK-1に産出する貝化石群集に基づいた堆積環境の変遷を次のようにまとめた。すなわち, 堆積環境は下位から汽水域の潮間帯泥底 (9,000 ~ 8,000 yrBP), 汽水 - 海域の潮間 - 潮下帯以深 (8,000 ~ 7,000 yrBP), 潮下帯もしくは内湾泥底 - 潮間帯砂泥底 (7,000 ~ 4,000 yrBP)と変化している。これは層相から判断される堆積環境と大きく違うことはなく, 本報告で認定された層相は貝化石相とも一致することが指摘される。

6-2 中川低地の沖積層との対比

中川低地には多くの土質調査ボーリングとともに放射性炭素年代及び層相が検討された MS-3 (遠藤ほか, 1992)が存在する。ここでは, MS-3とGS-SK-1の層相の対比, MS-3から推定される中川低地の堆積環境変遷との対比を行う。

中川低地に分布する沖積層層序の研究 (遠藤ほか, 1992 など)に基づけば, 七号地層は淡水成の砂泥互層で基底に河川成の砂礫層(BG)を有し, 有楽町層は基底のHBGと呼ばれる砂礫層ないし礫混じり砂層とその上位の汽水から海水成の粘土, 砂質シルト, 砂層からな

るとされる。

これに対比すると, GS-SK-1はUnit 2 (深度 51.8 ~ 48.9 m)がBGに, Unit 7 (深度 6.3 ~ 2.4 m)が有楽町層上部に対比可能であるが, Unit 3 ~ 6 (深度 48.9 ~ 6.3 m)までを層相のみからわかることは難しい。例えば, 層相からはUnit 2 (深度 51.8 ~ 48.9 m)及びUnit 3 (深度 48.9 ~ 39.6 m)が七号地層, Unit 4 ~ 6 (深度 39.6 ~ 6.3 m)が有楽町層下部とすることもできるが, 実際には有楽町層下部は海成と考えられており, 正確にはその定義には当てはまらない。

ごく近くで検討された土質調査ボーリングコアの例 (遠藤ほか, 1988b)でも, 深度 38 ~ 50 mまでを七号地層, それより上位を有楽町層としているが詳細な堆積相の観察が行われているわけではない。また, 有楽町層自体は 10,000 yrBP 以降の堆積物であるという考え方もあり (例えば青木・柴崎, 1966; 遠藤ほか, 1992; 遠藤ほか, 1995 など), この場合にはUnit 3 基底近くまでが有楽町層と判断される。地層の区分に関しては定義の問題も含め, 多くのボーリングから検討する必要があるため, 本報告ではこれ以上の解釈は行わないこととする。

中川低地の堆積環境に関しては, 主として遠藤ほか (1992)によって三郷市に掘削された, 層序ボーリング MS-3での層相, 珪藻化石, 放射性炭素年代に基づき, 次のように変化していったと考えられていた。(1) 12,000 ~ 10,000 年前ごろ, 河口環境となり, 七号地層に相当する砂泥互層が短期間で堆積する, (2) 10,000 年前頃に七号地層は下刻されて, その不整合面上にHBGが形成される, (3) 9,000 ~ 5,500 年前の間, 内湾環境が卓越する, (4) 5,500 年前以降, デルタの急成長に伴う堆積速度の急増が起こり, (5) 自然堤防 - 沼沢地の環境で砂泥互層が堆積する。更に, 有孔虫や堆積深度から, 約 8,000 年前の三郷付近は水深 5 ~ 10 m, 5,500 年前ごろは水深 20 ~ 25 m 程度であったと見積もり, 5,500 年以降の急激な堆積速度の増加は, 単なるデルタの前置面の通過ではなく, 海水準の微低下や気候の湿潤化によるデルタの前進速度の変化, 供給河川の流路変化などによるものと考えた。

遠藤ほか (1992)のMS-3はGS-SK-1から南東に 4 km ほどの, 比較的近いところに位置する。GS-SK-1とは, 地層の空間的な分布の不連続性を考えたとしても, いくつかの相違点が認められる。そのうちでも, GS-SK-1にはHBG相当層 (MS-3では深度 40 m)が認められない点が最も大きな違いである。MS-3に認められるHBGの層相は, 斜交層理の発達する粗粒 - 細粒砂で, シルトのリップアップクラストを含むとしている。その不整合の証拠としては, 有機質シルトと砂の互層を削剥していることがあげられている (遠藤ほか, 1992), そしてこのHBGを境に, ここから上位は急激に内湾化

が進んだと考えられている。このMS-3のHBGの記載は、GS-SK-1のUnit 3中のクレパス・スプレー堆積物もしくは河川充填堆積物の特徴とほとんど変わらず、その上下の層準の層相も良く似ていることから、実際には同じ堆積物を見ている可能性が高い。一方で、MS-3ではHBGの周辺で絶対年代は得られていないが、GS-SK-1ではこの堆積物の上下で放射性炭素年代が得られ、それらが9,700～8,900 yrBPの値を示す。すなわち、これがいわゆるHBGが形成されたと考えられている11,000 yrBP(遠藤ほか, 1995など)とは有意に異なる。更にGS-SK-1では、この上位に塩水湿地・泥質干潟が厚く堆積するという点が、内湾が広がったと考えているMS-3と異なるが、実際にはMS-3の有楽町層下部(深度36～23 m)も珪藻化石群集も海生種のみではなく、汽水生種が卓越すること(小杉, 1992)、関本(1992)では、深度30 m(標高-28 m)までは有孔虫が認められないことから、河川の影響が強かったか、完全に海が入っていないかと考えられている。これらを考え合わせると、本報告の堆積環境の変遷と大きな違いが認められない。これらのことから、MS-3はGS-SK-1対比可能であり、この解析結果を中川低地全体に対比できる可能性を示唆している。

6-3 層相と堆積物の物性

GS-SK-1に見られた層相の違いは、堆積物の物性を意味する値、すなわちN値、泥分含有率、湿潤密度、乾燥かさ密度、帯磁率、含水比、明度、色相と少なくとも一部は対応しているということが明らかになった(第2図, 第4図)。全体を通して、砂層が卓越する層準と泥層が卓越する層準で、堆積物の物性に違いがあり、沖積層基底礫層のUnit 2からUnit 4, Unit 5からUnit 6中部への上方細粒化、Unit 6上部からUnit 7への上方粗粒化に対応して、N値、湿潤・乾燥密度、含水比及び泥分含有量が漸移的に変化する。砂層が卓越する層準と泥層が卓越する層準での堆積物の物性の違いのあるのは当然であるが、Unit 4の厚い泥層では、同じ泥層中でも上位に向かって系統的に変化する。また、物性によっては、層相と明瞭な対応を見せない場合も認められた。これらは堆積環境や堆積深度などと複雑に関係しており、現時点で層相とこれらの特性との対応関係を一般化して議論することは難しい。これらの示す値の統合的な解釈は、今後の検討にゆだねられるところが大きい。

GS-SK-1Nで得られたN値は泥分含有率と最も良い対応を見せたが(第2図)、堆積物の物性を意味する湿潤密度や乾燥かさ密度、含水比など連続的な変化を見せるものとの対応は一部の点を除き明瞭ではない。一般にN値は堆積物の粒度と密接な関係があるとされる(N値の話編集委員会, 1998)。GS-SK-1でも、ほぼこの

常識に従った対応を示しているが、高い含水比のためか、薄い砂層を多く挟在するUnit 4最上部でのN値は、必ずしも高くない。海水準の位置を推定するのに重要な干潟堆積物に特徴的な薄い砂層を挟む泥層(Unit 4)はN値のみでは認識できず、既存の土質ボーリングの対比や堆積環境の解釈には詳細な堆積物の記載が必要である。

湿潤・乾燥かさ密度は、おおよそ深度20～30 mまでは比較的層相との対応が良いものの、それ以深では値そのものは砂層と泥層で顕著な違いが認められず、値の集中度やばらつきが層相と対応する(第4図)。この傾向はMSCLで得られた値、キューブ試料として得られた値の両者ともに見られ、サンプリングや測定の影響によるものではない。このことは少なくともGS-SK-1で検討された深度20～30 m以深では、密度が層相の違いよりも圧密との関連性が強いということの意味し、層相を密度の深度方向への値のみから判断することができないことを示している。また、Unit 4では深度20～40 mの間に乾燥かさ密度でおよそ0.8 g/cm³から1.1 g/cm³まで変化し、この値は層準によっては泥層と砂層の違いよりも大きい。沖積層の圧密は地盤沈下と深く関係していることからこれらの値は地域差も大きいと推定できる。

含水比と湿潤・乾燥かさ密度は、ほぼ反比例の関係を示す。GS-SK-1では泥質なところ、もしくは深度が浅い方が乾燥かさ密度は小さいので、含水比もそれに対応して増加する。最も高い含水比を持つ層準は、Unit 4最上部の薄い砂層を挟む泥層から巣穴状生痕を多く含む泥層(およそ深度20 m前後)である。同じような層相を持つUnit 6中部から上部にかけての泥層及び薄い砂層を挟在する泥層であるが、Unit 4最上部よりも明らかに含水率が低い。ごく浅い層準を除き、おおよそ深度10～20 m付近で最も高い含水比を持つという傾向は、東京都で掘削されたボーリングコアでも認められるが(清水, 1972; 中山・中村, 2000)、これが堆積環境の違いを反映したものかどうかははっきりとせず、現段階ではその原因は不明である。

明度(L*)は粒度と、色相のうちa*はその変曲点が層相区分に、b*はそのばらつきが粒度に関連して変動する(第4図)。変曲点のある層準や変化傾向は層相区分と似ているものの、これらの値は、現在得られているN値、密度、帯磁率など堆積物の特性と明瞭な相関関係を持つものではない。堆積物の明度や色相は、深海底堆積物の場合には鉱物や元素の濃度とその化学形態や酸化還元境界の指標になることがあるとされている(中嶋, 1994)。一方、沖積層では明度は含砂量や火山灰層の挟在層準に関係して変動するという例もある(三浦ほか, 2002; 大塚ほか, 2002)。現在のところ、粒度が明度と色相(b*)に関係し、泥層の深度(もしくは含水

比)が明度及び色相 (a^*)に關係する傾向が認められるが、これらが実際に何を反映しているのかは今後の課題である。

帯磁率(初磁化率)は、火山灰層の同定や鉄鉱物の含有量の推定に用いられる(山田ほか, 1998など)。MSCL及びキューブ試料から求められた帯磁率のプロファイルはほぼ同じ変動を示し、砂質部分では高く、泥質部分では低い値を示した。しかしながら、砂鉄の濃集部分を示す深度48 mのピーク以外は、火山灰層等の兆候は認められなかった。すべての層準にわたってキューブ試料を得、処理を行うことは極めて手間がかかり、連続的に値を得るためにはMSCLの方が適しているといえる。

7. まとめ

埼玉県の中川低地地下の沖積層の層序・堆積相を明らかにするため、埼玉県草加市、柿木浄水場敷地内でGS-SK-1 (GS-SK-1A, GS-SK-1N, GS-SK-1T)が掘削された。得られたオールコア(GS-SK-1A)に見られた堆積相とその積み重なり、堆積物の物性、放射性炭素年代などを検討した。その結果、下位から河川チャネル充填堆積物、氾濫原及び自然堤防堆積物、塩水湿地・泥質干潟堆積物、砂質干潟・砂州堆積物、内湾(プロデルタ・デルタフロント)・干潟堆積物、河川チャネル・氾濫原堆積物と重なる。放射性炭素年代は、これらの堆積物が少なくともおよそ10,000 yrBPから4,200 yrBPの間ほぼ整合的に積み重なったことを示していた。一方、GS-SK-1に見られた層相の違いは、N値、泥分含有率、湿潤密度、乾燥かさ密度、帯磁率、含水比、明度、色相に反映されているということが明らかになった。

これらの結果からは、最終氷期に形成された谷底の河川チャネルを埋積した後、9,000～8,000 yrBPは海水準にあわせて干潟もしくは塩水湿地がキープアップしつつ発達し、縄文海進最盛期に内湾化、その後デルタの前進によってその内湾が埋積していった過程が推定できる。一方堆積物の物性は、堆積環境や堆積深度などと複雑に關係しており、現時点で層相とこれらの特性との対応關係を一般化して議論することは難しい。これらの示す値の統合的な解釈は、今後の検討にゆだねられるところが多い。

謝辞:本研究を行うにあたって、産業技術総合研究所の池原 研博士にはMSCLの利用の便宜を、産業技術総合研究所の七山 太博士にはコア処理室利用の便宜を、斎藤文紀博士からはコア処理法に関して貴重なアドバイスをいただいた。ボーリング調査においては、埼玉県柿木浄水場の方々には用地の利用などにあたって大変お世話になった。ここに深く感謝いたします。

文 献

- Allen, G.P. and Truilhe, G. (1988) Stratigraphic and facies model of a transgressing estuarine valley fill in the Gironde Estuary (France). *Mem. Can. Soc. Petrol. Geol.*, no. 15, 575.
- 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.
- 有田正史 (1983) 堆積物の軟X線撮影法 -その2-. 地質ニュース, no.350, 46-56.
- 有田正史・中村康夫 (1981) 堆積物の軟X線撮影法 -その1-. 地質ニュース, no.350, 29-33.
- Coleman, J.M. (1981) *Deltas, Processes of deposition and models for exploration*, 2nd ed. Burgess Pub., 124p.
- Collinson, J.D. (1996) Alluvial sediments. In Walker R.G. and James, N.P., eds., *Facies Models: Response to Sea Level Change*, Geological Association of Canada, Waterloo, Ontario, 37-82.
- Dalrymple, R.W. (1992) Tidal depositional systems. In Walker R.G. and James, N.P., eds., *Facies Models: Response to Sea Level Change*, Geological Association of Canada, Waterloo, Ontario, 195-218.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. and Boyd, R. (1992) Estuarine facies model: conceptual basis and stratigraphic implications. *J. Sediment. Petrol.*, **62**, 1130-1146.
- Dalrymple, R.W., Boyd, R. and Zaitlin, B.A. (1994) History of research, types and internal organization of incised-valley systems: introduction to the volume. In Dalrymple, R.W., Boyd, R. and Zaitlin, B.A. eds., *Incised valley systems: Origin and sedimentary sequences*, SEPM Special publication, no. 51, 3-10.
- 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・高野 司 (1983) 草加市の沖積層. 草加市研究, no. 3, 31-46.
- 遠藤邦彦・小山 司・長田敏明 (1985) 縄文海進期の草加干潟の時代一. 草加市史研究, no. 4, 57-56.
- 遠藤邦彦・小杉正人・菱田 量 (1988a) 関東平野の沖積層とその基底地形. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, no. 23, 37-48.
- 遠藤邦彦・小杉正人・高野 司 (1988b) 草加市の地質. 草加市史編纂委員会編, 草加市史 自然・考古編,

- 草加市, 23-69.
- 遠藤邦彦・印牧もところ・中井信之・森 育子・藤沢みどり・是枝若奈・小杉正人 (1992) 中川低地と三郷の地質. 三郷市史編纂委員会編, 三郷市史, 三郷市, 35-111.
- 遠藤邦彦・牧野内猛・坪田邦治・岩尾雄四郎 (1995) 沖積層の形成過程. 土と基礎, **43**, 8-12.
- Evans, H.B. (1965) GRAPE – A device for continuous determination of material density and porosity. *SPWLA, 6th Ann. Symposium*, **2**, 25.
- N 値の話編集委員会編著 (1998) N 値の話. 理工図書, 188p.
- Galloway, W.E. (1981) Depositional architecture of Cenozoic gulf coastal plain fluvial systems. In Cant, D.J. and Hein, F.J. eds., *Approaches to Interpretation of Sedimentary Environments*, SEPM Special Publication, no. 31, 127-155.
- 伊勢屋ふじこ・増田富士雄 (1985) “逆グレーディング構造”: 洪水堆積物認定の指標. 筑波の環境研究, no. 9, 63-69.
- 石原与四郎・木村克己・中島 礼・宮地良典・田辺 晋・中山俊雄・斎藤文紀 (2004) 東京低地と荒川低地から得られた3本のボーリングコアの堆積相と放射性炭素年代: DKコア(江東区新砂), TNコア(足立区舎人公園), HAコア(東綾瀬公園). 地調研報, **55**, 221-235.
- 小杉正人 (1988) 珪藻化石からみた草加市及びその周辺の古環境. 草加市史編纂委員会編, 草加市史 自然・考古編, 草加市, 71-102.
- 小杉正人 (1992) 珪藻化石群集からみた最終氷期以降の東京湾の変遷史. 三郷市編纂委員会編, 三郷市史, 三郷市, 112-193.
- 増田富士雄 (2000) 堆積曲線から求める堆積年代と累重速度. 月刊地球, **22**, 191-196.
- 増田富士雄 (2002) 掘削コアから推定した大阪湾の海況変動. コア精密対比研究会・日本応用地質学会関西支部編, コア精密対比による京阪神地域の地下地質・地下構造の高精度解説, コア精密対比研究会・日本応用地質学会関西支部, 117-127.
- 増田富士雄・伊勢屋ふじこ (1985) “逆グレーディング構造”: 自然堤防帯における氾濫原洪水堆積物の示相堆積構造. 堆積学研究会報, no. 22/23, 108-116.
- 増田富士雄・宮原伐折羅・広津淳志・入月俊明・岩淵 洋・吉川周作 (2000) 神戸沖海底コアから推定した完新世の大阪湾の海況変動. 地質雑, **106**, 482-488.
- Masuda, F., Irizuki, T., Fujiwara, O., Miyahara, B. and Yoshikawa, S. (2002) A Holocene sea-level curve constructed from a single core at Osaka, Japan (A preliminary note). *Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ., Ser. Geol. & Mineral.*, **59**, 1-8.
- Miall, A.D. (1992) Alluvial deposits. In Walker R.G. and James, N.P., eds., *Facies Models: Response to Sea Level Change*, Geological Association of Canada, Waterloo, Ontario, 119-139.
- 三浦健一郎・七山 太・内海 実・杉山雄一・安原盛明・横山芳春・北田奈緒子・竹村恵二 (2002) 新淀川郡列ボーリングコアの高精度解析に基づく上町断層の完新世活動性評価. 活断層・古地震研究報告, 産業技術総合研究所・地質調査総合センター, no. 2, 109-123.
- 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・堆積物特性と放射性炭素年代. 地調研報, **55**, 201-219.
- 中嶋 悟 (1994) 地球色変化. 近未来社, 東京, 292p.
- 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.
- 中山俊雄・中村正明 (2000) 江東区枝川地区における沖積層の層相と土質特性. 東京都土木技術研究所年報 (2000), 191-200.
- 大塚和弘・七山 太・三浦健一郎・池田倫治・金山清一・小林修二・徳間伸介・安間 恵・横山芳春・安原盛明・杉山雄一・佃 栄吉 (2002) 中央構造線活断層系伊予セグメント西端部, 下灘沖南断層の完新世活動履歴. 活断層・古地震研究報告, 産業技術総合研究所・地質調査総合センター, no. 2, 125-140.
- Reading, H.G. and Collinson, J.D. (1996) Clastic coasts. In Reading, H.G. ed., *Sedimentary Environments: Process, Facies and Stratigraphy, third edition*, Blackwell Science, Oxford, 154-231.
- 埼玉県 (1979) 1/50,000土地分類基本調査(地形分類図)「野田」. 国土地理院.
- Saito, Y. (1995) High-resolution sequence stratigraphy of an incised-valley fill in a wave- and fluvial dominated setting: latest Pleistocene-Holocene examples from the Kanto Plain, central Japan. *Mem Geol. Soc. Japan*, no. 45, 76-100.
- 斎藤文紀 (1995) 河口デルタの埋積システム—小櫃川三角州の形成機構—. 大沢雅彦・大原 隆編, 生物・地球環境の科学—南関東の自然誌—, 朝倉書店, 29-40.
- Scruton, P.C. (1960) Delta building and deltaic sequence. In Shepard, F.P., Phleger, F.B. and van Andel, T.H. eds., *Recent Sediments, Northwest Gulf of Mexico*, American Association of Petro-

- leum Geologists, Tulsa, OK, 82-102.
- 関本勝久 (1992) 有孔虫化石群集からみた三郷市およびその周辺地域の古環境. 三郷市編纂委員会編, 三郷市史, 三郷市, 329-364.
- Shibasaki, T., Aoki, S. and Kuwano, Y. (1971) Significance of buried valleys and other topographies in elucidating the Late Quaternary geohistory of Japanese coastal plains. *Quaternaria*, **14**, 217-236.
- 清水恵助 (1972) “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, 251-266.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, F.G., v. d. Plicht, J., and Spurk, M. (1998) INTCAL98 Radiocarbon age calibration 24,000 - 0 cal BP. *Radiocarbon*, **40**, 1041-1083.
- Tittman, J. and Wahl, J.S. (1965) The physical foundations of formation density logging (gamma-gamma). *Geophysics*, **30**, 284-294.
- 山田和芳, 齊藤耕志, 福澤仁之 (1998) 汽水湖底堆積物の採取・分析方法とその最近の進歩. LAGUNA (汽水域研究), no. 5, 63-73.
- Vail, P.R., Audemard, F., Bowman, S.A., Eisner, P.N. and Perez-Cruz, C. (1991) The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology—an overview. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A., eds., *Cycles and Events in Stratigraphy*, Springer-Verlag, Berlin, 617-659.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., and Mitchum, R.M.Jr. (1988) An overview of the fundamental of sequence stratigraphy and key definitions. In Wilgus, C.K., Hasting B.S., Kendall, C.G. St C., Posamentier, H., Ross C.A. and Van Wagoner, J. eds., *Sea-level changes-an Integrated Approach*, Spec. Publ. SEPM, no. 42, 39-45.

(受付：2004年8月17日；受理：2004年10月21日)