

伊勢湾・三河湾における海底堆積物と海洋環境

Spatial distributions of marine sediment and environment in the Ise Bay and Mikawa Bay, central Japan

天野敦子^{1*}・清家弘治¹
AMANO Atsuko^{1*} and SEIKE Koji¹

Abstract: We analyzed grain size, concentrations of total organic carbon, total nitrogen and total sulfur, stable isotope ratios of organic carbon and nitrogen, and mineral composition of surface sediments collected from 44 sites in the Ise Bay and Mikawa Bay and demonstrated the present seafloor environment. The silty sediments over 6 φ were deposited in the inner and central parts of the bays of Ise and Mikawa bays and grain size became coarse from the central part to the mouth of the bays. This distribution pattern of grain size indicates that the inner and central part of the bay were slow tidal current and stagnant condition and tidal current increased toward the bay mouth. The concentrations of total organic carbon, total nitrogen and total sulfur are relatively high in the inner and central part of the bay and decreased in the bay mouth. These results indicated high organic matter load and low oxygen content caused by stagnant condition. The ratio of total organic carbon and total nitrogen, stable isotope ratios of organic carbon and nitrogen which are indicators of the origin of organic matter in the sediments show that most of organic matter in the sediment originated by marine planktonic matters, while the contribute of terrestrial plant detritus increases near the offshore of river mouth and the bay mouth. The mineral composition changes are considerably related to grain size. The composition of muscovite increased in the Matsusaka-Ise offshore part and this result indicate that the mineral composition is influenced by the supply action of the inflow river from the southwestern part of Ise Bay. Comparison with the grain size distribution in the 1970s–1980s suggests that the bottom sediment in the western part of the southern Chita Peninsula may have become a finer from the 1970s–1980s to the 2000s–2010s.

Keywords: bottom surface sediment, grain size, organic geochemical properties, mineral composition, Ise Bay and Mikawa Bay.

要 旨

伊勢湾、三河湾の44地点で採取した表層堆積物を用いて、粒度、全有機炭素・全窒素・全硫黄濃度、有機炭素・窒素安定同位体比、鉱物組成の分布を明らかにし、現在の海底環境について検討した。粒度分布は伊勢湾、三河湾の湾奥、湾央部では中央粒径値6～8φの細粒なシルトが堆積し、湾口部に向かって粗粒化することを示す。このパターンは湾奥、湾央部では潮流は遅く、停滞的な水理環境で、湾口部では潮汐流が速くなることを示す。全有機炭素、全窒素、全硫黄濃度は湾奥、湾央部で高いことを示す。これら結果は、停滞的な環境であるため、有機物負荷量が多く、酸素の少ない還元的な海底環境であることを示す。堆積物中の有機物起源の指標となる全有機炭素全窒素量比と有機炭素・窒素安定同位体比は湾奥部では海洋プランクトン起源の有機物が大部分を占めるが、河口沖合や湾口部では陸上植物起源の有機物の寄与が増加すること

を示す。鉱物組成の変化は粒度との関係が強いが、松阪－伊勢沖合では白雲母の割合が高くなり、伊勢湾南西部からの流入河川の供給作用の影響を受けていることを示す。本結果と1970～1980年代の粒度分布を比較すると、1970～1980年代から2000～2010年代にかけて知多半島南部の西方海域で底質が細粒化した可能性を示唆された。

1. はじめに

海域と陸域が接する沿岸域の環境は、複雑な物質循環過程の影響で生物の多様性や生産性が高い場所となっている。また、沿岸域は歴史時代から輸送や農業、漁業などの人間活動が盛んな場所であり、近代化に伴い急激な環境変化が生じた場所も多い。沿岸域の環境の中でも、地形的に閉鎖性の強い内湾では、特に陸域から排出された物質が滞留、堆積しやすく、湾内の環境に大きな変化を引き起こす要因となる。

*Corresponding author: AMANO, A., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail:amano-a@aist.go.jp

1 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)

人口が集中する都市や工業地帯を後背地に持つ伊勢湾、三河湾は、湾口部が狭く、閉鎖性の強い内湾である。1950年代から1970年代にかけての高度経済成長に伴う急速な産業発展の影響を受けて、伊勢湾、三河湾の海洋環境の汚染、汚濁が顕著となり、海洋観測や海水、堆積物などの試料採取による実態把握と物質収支を目的とした研究が行われてきた（例えば、陶ほか、1982；西村、1976）。特に、夏季に発生する貧酸素水塊は漁業資源に被害を及ぼす深刻な問題となっている（中村・黒田、2005）。貧酸素水塊の挙動の把握や発生原因の解明のために水質観測記録（黒田・藤田、2006）や数値計算（宇野木・小西、1998）による研究が行われ、近年の貧酸素水塊の拡大の原因として湾内の物質循環機能の低下が指摘されている。

物質循環を定量的に捉える上で、堆積過程の時空間変化は海底への物質移動、蓄積量を評価する基礎情報となる。そこで本研究は、海底表層堆積物を用いて粒度、全有機炭素、全窒素、全硫黄濃度、有機炭素、窒素安定同位体比、鉱物組成の空間分布を明らかにし、現在の堆積過程と海底環境との関係について検討した。

本論は、地質調査総合センター速報 No.79（天野ほか、2019）、No.81（清家・天野、2020）で報告された結果に加えて、地球化学図作成のために2006年に採取された試料も含めて分析した結果等を追加して考察を行い、海陸シームレス情報集として取りまとめたものである。

2. 地域概説

2.1 海底地形と海洋環境

本研究の調査海域は志摩半島と渥美半島の間に位置する伊良湖水道とで太平洋と連結する伊勢湾、及び知多半島と渥美半島の間に位置する師崎水道、中山水道とで伊勢湾と連結する三河湾である（第1図）。伊勢湾の海底の大部分は水深40 mよりも浅く、海岸線から湾央部に向かって深くなる。また、伊勢湾湾口部の伊良湖水道周辺では水深は急激に深くなり、水深100 mを超える海域もある。三河湾の海底は水深15 mよりも深い部分が大半を占め、佐久島、篠島周辺と知多半島南端で局所的に水深20 mよりも深くなる海域がある。

海上保安庁が発行した「伊勢湾潮流図」（海上保安庁、2004）によると、伊勢湾、三河湾の海面下5 mの潮流の流向はほぼ地形に沿って流れしており、外洋から湾内に向かう潮流は伊良湖水道において神島寄りの流れは伊勢湾へ、渥美半島寄りの流れは三河湾へ向かって流入する。また、潮流速は湾口部では速いが、湾口部から湾央部に向かって急速に減衰し、湾央一湾奥部では非常に遅いことを示す。

伊勢湾では、夏季には湾奥部、湾央部では時計回

り、知多半島南方の湾口部では反時計回りの残差循環流が発生する（佐藤、1996）。三河湾では、観測記録と数値計算結果から夏季には西向きの流れが、冬季には南向きの流れが卓越する（宇野木、1983；田中ほか、2010）。

伊勢湾、三河湾では、表層の河川水の混合によって形成された低密度水が湾口へ向かって流出し、反対に塩分の高い外洋水と混合した高密度水が湾口の下層から流入するエスクアリーリー循環流が発達している（高橋ほか、2000；藤原、2002）。このエスクアリーリー循環によって、伊勢湾では伊良湖水道を通じて太平洋から、三河湾では中山水道を通じて伊勢湾から、各湾内の海水に比べて高塩分、高酸素濃度の海流が流入し、生物生産や貧酸素水塊などに影響を及ぼしている可能性が示唆されている（鈴木、1998；高橋ほか、2000）。

2.2 伊勢湾、三河湾周辺の地質概要

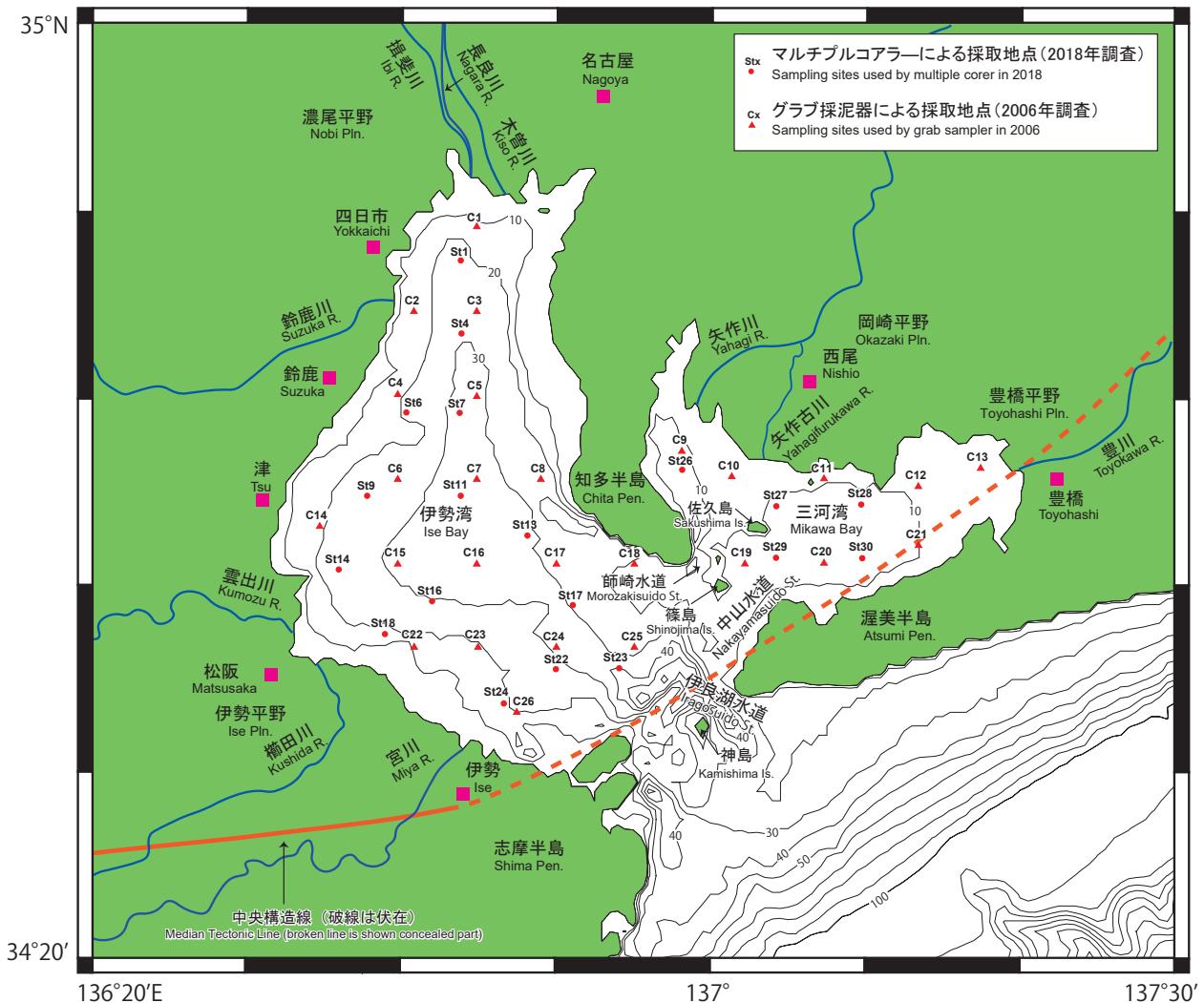
伊勢湾、三河湾周辺の地質は志摩半島、知多半島の北方に北東一南西方向で横切る中央構造線によって大きく区分され（第1図）、中央構造線よりも北側は西南日本内帯に、南側は西南日本外帯に含まれる（牧本ほか、2004；水野ほか、2009）。西南日本内帯において、布引山地や三河湾北東方の三ヶ根山、桑谷山、三堂山などを含む山地では後期白亜紀に形成された領家帶花崗岩類が、鈴鹿山地では飛騨帶花崗岩類や新第三系の瀬戸内海中新統が分布する。一方で西南日本外帯には秩父帯、四万十帯付加複合体と三波川変成岩類が分布する。

伊勢湾の北方に広がる濃尾平野は、木曽川、長良川、揖斐川などによって運搬される堆積物によって形成される。濃尾平野は濃尾傾動地塊運動によって過去100万年間沈降しており（桑原、1968），これも広大な平野を形成する一因となっている。また、伊勢湾の西方には鈴鹿山脈と布引山地が位置し、これら山地形と伊勢湾の間には伊勢平野が広がり、櫛田川、宮川の河口で三角州が形成されている。三河湾では、北方に矢作川、鏡川の流れる岡崎平野が、湾奥部東方には豊川の流れる豊橋平野が位置する。

3. 試料採取・分析方法

3.1 試料採取方法

2018年9月27～29日に第三開洋丸（海洋エンジニアリング株式会社所有）によってコア径8.2 cm、最長コア長40 cmの堆積物コアが4本採取できる小型マルチプルコアラー（MC）を用いて伊勢湾、三河湾の全19地点で採泥作業を行い、18地点で堆積物試料が採取された（第1図、第1表）。採取地点と試料番号は異なるため、本報告では採取地点を用いて説明を行う。採取されたMC試料のうち1本は船上で1 cm間隔でサブ



第1図 調査海域と試料採取地点図. St1~St30 は 2018 年, C1~C26 は 2006 年の採取地点を示す. 等深度線は岸本 (2000) を使用した.

Fig. 1 Study area and sampling sites. Surveys were conducted in 2018 (St1-St30) and 2006 (C1-C26). The topography based on Kishimoto (2000).

サンプリングし, 本研究の分析に用いた. 全ての MC 試料のコア深度 0 ~ 1 cm を表層堆積物試料とした. これに加えて, 本研究は 2006 年 12 月 13 ~ 16 日に 26 地点においてスミス・マッキンタイヤー式グラブ採泥器 (SM) を用いて地球化学図作成用に採取された試料も分析に使用した. 採取された SM 試料の表層 0 ~ 3 cm はプラスチック容器に取り分られ, 研究室で自然乾燥し, 常温で保存されていた. 本研究ではこの乾燥試料を分取し, 凍結乾燥させた試料を表層堆積物試料として分析を行った.

3.2 粒度

MC 試料の表層堆積物試料の大部分は泥質堆積物で, 細粒砂よりも細かな試料であったため, すべての試料について SALD-2100 (島津製作所製) を用いてレーザー回折・散乱法による分析が行われた (天野ほ

か, 2019). SM 試料は, 砂質堆積物も含むため, 含泥率が 20 %以上の試料はレーザー回折・散乱法 (LA960, HORIBA 製, 産総研 地質調査総合センター共同利用実験室) で, 20 %未満の試料は -4 ~ 4φ の 0.25 φ 刻みのふるい振盪法で分析が行われた. レーザー回折・散乱法の粒径頻度分布は体積で, ふるい振盪法は重量で表される. 粒度結果は中央粒径値 (Median diameter, 以下 $Md\phi$) で示す. また, これら分析結果を基に Folk and Ward (1957) の計算式を用いて淘汰度を求めた.

3.3 全有機炭素・全窒素・全硫黄濃度と有機炭素・窒素安定同位体比

全有機炭素 (TOC)・全窒素 (TN) 元素濃度分析では凍結乾燥, 粉碎した試料を銀カップに 10 mg 程度を秤量し, 無機炭素を除去するために 1N の塩酸を加えて乾燥させた後, 錫カップで包んだ試料を用いた. 全硫

第1表 試料採取地点の位置及び粒度指標 .

Table 1 Sampling location and grain size properties.

採取地点 /Site	採泥器 /Sampler No.	採取位置/Location		水深/Water depth (m)	粒度分析方法 /grain size analysis	中央粒 径値 (ϕ)	淘汰度 /sorting	含有率/content (%)				含泥率 /mud content (%)
		緯度/Lat.	経度/Long.					/gravel	/sand	/silt	/clay	
St1	MC	34° 57.0083'N	136° 43.4649'E	26.9	レーザー/Laser	7.36	1.56	0.0	0.1	65.0	34.9	99.9
St4	MC	34° 55.2116'N	136° 43.5974'E	31.9	レーザー/Laser	6.70	1.78	0.0	4.1	71.7	24.2	95.9
St6	MC	34° 49.1571'N	136° 40.2208'E	24.2	レーザー/Laser	7.10	1.74	0.0	2.0	67.2	30.8	98.0
St7	MC	34° 49.2019'N	136° 43.5418'E	35.3	レーザー/Laser	6.79	1.73	0.0	2.9	71.8	25.3	97.1
St9	MC	34° 45.0236'N	136° 38.0473'E	28.8	レーザー/Laser	6.76	1.76	0.0	3.0	71.8	25.2	97.0
St11	MC	34° 45.0131'N	136° 43.4968'E	37.8	レーザー/Laser	6.78	1.73	0.0	2.8	71.9	25.3	97.2
St13	MC	34° 42.4757'N	136° 48.3295'E	34.0	レーザー/Laser	6.12	1.92	0.0	10.7	70.3	19.1	89.3
St14	MC	34° 41.1086'N	136° 36.0963'E	27.0	レーザー/Laser	6.49	1.76	0.0	4.6	73.7	21.7	95.4
St16	MC	34° 39.2678'N	136° 42.2212'E	32.3	レーザー/Laser	6.39	1.87	0.0	8.2	70.6	21.2	91.8
St17	MC	34° 39.1929'N	136° 50.4802'E	34.3	レーザー/Laser	5.27	2.15	0.0	25.2	59.0	15.8	74.8
St18	MC	34° 37.4132'N	136° 39.0397'E	20.6	レーザー/Laser	6.80	1.81	0.0	3.8	70.0	26.2	96.2
St22	MC	34° 36.1003'N	136° 49.5273'E	30.8	レーザー/Laser	4.76	2.18	0.0	34.3	52.6	13.1	65.7
St23	MC	34° 35.9224'N	136° 53.6123'E	41.7	レーザー/Laser	4.85	2.17	0.0	31.1	55.1	13.8	68.9
St24	MC	34° 34.2186'N	136° 46.3753'E	19.8	-	-	-	-	-	-	-	-
St26	MC	34° 46.3395'N	136° 57.5524'E	16.0	レーザー/Laser	6.23	1.81	0.0	7.1	74.1	18.8	92.9
St27	MC	34° 44.3210'N	137° 3.5540'E	11.0	レーザー/Laser	6.27	1.77	0.0	7.3	74.4	18.3	92.7
St28	MC	34° 44.2979'N	137° 9.0517'E	14.4	レーザー/Laser	6.98	1.68	0.0	1.1	71.3	27.6	98.9
St29	MC	34° 41.4317'N	137° 3.6143'E	19.4	レーザー/Laser	3.46	2.17	0.0	60.0	31.4	8.6	40.0
St30	MC	34° 41.6207'N	137° 9.2637'E	16.9	レーザー/Laser	6.44	1.63	0.0	4.2	77.5	18.3	95.8
C1	SM	34° 58.9775'N	136° 44.9881'E	17.0	レーザー/Laser	6.85	1.06	0.0	0.0	56.3	43.7	100.0
C2	SM	34° 54.5049'N	136° 40.9656'E	19.2	レーザー/Laser	6.99	1.23	0.0	0.6	49.6	49.8	99.4
C3	SM	34° 54.4750'N	136° 44.9923'E	30.0	レーザー/Laser	7.11	1.35	0.0	0.3	45.4	54.3	99.7
C4	SM	34° 49.9904'N	136° 39.9829'E	22.8	レーザー/Laser	7.24	1.19	0.0	0.3	40.0	59.7	99.7
C5	SM	34° 49.9685'N	136° 45.0025'E	37.0	レーザー/Laser	6.84	1.38	0.0	0.1	55.6	44.4	99.9
C6	SM	34° 45.5099'N	136° 39.9830'E	28.2	レーザー/Laser	7.04	1.27	0.0	0.0	48.4	51.6	100.0
C7	SM	34° 45.4990'N	136° 44.9716'E	37.6	レーザー/Laser	6.65	1.45	0.0	0.4	61.2	38.4	99.6
C8	SM	34° 45.4971'N	136° 48.9823'	31.0	レーザー/Laser	6.13	1.56	0.0	2.0	71.3	26.8	98.0
C9	SM	34° 46.9812'N	136° 57.9864'E	16.4	レーザー/Laser	5.88	1.49	0.0	6.4	79.4	14.2	93.6
C10	SM	34° 45.6544'N	137° 1.1732'E	7.0	篩/sieve	2.24	0.65	0.9	97.9	1.0	0.2	1.2
C11	SM	34° 45.4766'N	137° 6.9987'E	8.5	篩/sieve	1.15	1.87	15.2	78.8	5.6	0.4	6.4
C12	SM	34° 45.0858'N	137° 12.9972'E	12.5	レーザー/Laser	6.57	1.26	0.0	0.8	65.5	33.8	99.2
C13	SM	34° 46.0427'N	137° 16.9278'E	9.8	レーザー/Laser	6.27	1.39	0.0	3.2	70.5	26.3	96.8
C14	SM	34° 42.9951'N	136° 35.0116'E	23.4	レーザー/Laser	6.82	1.87	0.0	0.6	54.8	44.6	99.4
C15	SM	34° 40.9734'N	136° 39.9923'E	35.0	レーザー/Laser	7.09	1.64	0.0	0.0	47.0	53.0	100.0
C16	SM	34° 40.9975'N	136° 44.9928'E	36.2	レーザー/Laser	6.28	1.64	0.0	1.3	67.9	30.8	98.7
C17	SM	34° 40.9817'N	136° 49.9823'E	30.5	レーザー/Laser	3.89	1.56	0.0	17.2	75.2	7.5	82.8
C18	SM	34° 41.0118'N	136° 55.0069'E	19.8	レーザー/Laser	3.17	0.81	0.0	41.9	54.6	3.5	58.1
C19	SM	34° 40.9450'N	137° 1.9303'E	16.7	レーザー/Laser	2.84	1.41	0.0	57.7	39.7	2.6	42.3
C20	SM	34° 40.9931'N	137° 6.9809'E	18.6	レーザー/Laser	5.32	1.47	0.0	4.6	82.9	12.5	95.4
C21	SM	34° 41.9891'N	137° 13.0253'E	13.0	レーザー/Laser	6.24	1.54	0.0	1.3	69.9	28.8	98.7
C22	SM	34° 36.5149'N	136° 40.9873'E	16.8	篩/sieve	1.33	3.18	35.8	46.8	14.3	3.2	18.6
C23	SM	34° 36.5050'N	136° 45.0119'E	21.4	篩/sieve	-0.25	2.50	43.2	49.4	5.7	1.7	7.8
C24	SM	34° 36.4972'N	136° 49.9915'E	33.4	レーザー/Laser	3.85	1.67	0.0	21.0	70.4	8.5	79.0
C25	SM	34° 36.5073'N	136° 55.0051'E	33.8	レーザー/Laser	2.98	1.38	0.0	51.2	44.4	4.4	48.8
C26	SM	34° 32.9945'N	136° 47.4958'E	22.0	レーザー/Laser	5.73	1.79	0.0	4.5	72.0	23.4	95.5

黄 (TS) 濃度は、凍結乾燥、粉碎した試料を錫カップに 10 mg 程度を秤量し、五酸化バナジウム 5 mg 程度を添加して包んだ試料を用いた。TOC, TN 及び TS 濃度の測定は有機元素分析装置 (Flash2000, Thermo Fisher Scientific) を用いて行われた。

有機炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 分析では、無機炭素を除去するために、凍結乾燥、粉碎した試料をガラスバイアルに取り分け、1N の塩酸を加えて 1 昼夜放置した。その後、遠心分離機で余剰な塩酸を除去し、再度凍結乾燥、粉碎した試料を錫カップに 10 mg 程度秤量、包んだ試料を用いた。窒素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) の分析では、凍結乾燥、粉碎した試料を錫カップに 10 mg 程度秤量、包んだ試料を用いた。これら試料を安定同位体比質量分析計 Delta V Advantage (Thermo Fisher Scientific) を用いて分析した。

3.4 鉱物組成

鉱物組成は凍結乾燥、粉碎した試料を縦 25 mm、横 15 mm、高さ 1 mm の凹部を持つガラス製サンプルホールダーに入れて、X 線回折装置 (RINT2500, Rigaku, 産総研地質調査総合センター共同利用実験室) を用いて測定した。測定した結果は統合粉末 X 線解析ソフトウェア PDXL (Rigaku) を用いて Whole Powder Pattern Fitting (WPPF) による定量解析を行い、石英、ハライト、白雲母、曹長石、カオリナイトの組成比を求めた。

3.5 放射性炭素年代

放射性炭素 (^{14}C) 年代測定は St22, 23 と C22, 23 の貝試料を用いて、株式会社地球科学研究所に依頼して加速器質量分析計 (Acceleration Mass Spectrometer; AMS) で行われた。得られた ^{14}C 年代は Marine13 (Reimer *et al.*, 2013) ($\Delta\text{R} = 0$) をデータセットとし、CALIB ver.8.0 (Stuiver and Reimer, 1993) を用いて曆年校正を行った。

4. 結果

4.1 粒度

第 2 図に海底表層堆積物の粒度と含泥率の分布に加えて、佐藤 (2025) による音波探査記録で最終氷期最盛期後の堆積層が認められない海域を示す。

伊勢湾、三河湾の表層堆積物は中央粒径値 $-1 \sim 8 \phi$ の砂質及びシルト質粒子で構成される。これら湾の主要部にはシルト質堆積物が分布し、湾奥、湾央部では 6ϕ より細粒で、湾口部では 5ϕ 以下へと粗粒化する。 3ϕ よりも粗粒な砂質堆積物は伊勢湾南西部の松坂ー伊勢沖合、伊勢湾と三河湾の中山水道周辺、三河湾の北部に分布する。

第 3 図に砂、シルト、粘土粒子の含有率分布を示す。伊勢湾、三河湾の主要部にはシルト質堆積物が分布し、 -1ϕ 以上の礫粒子が確認された地点は松坂ー伊勢沖 (C22, 23) と三河湾北部 (C11) であった (第 1 表)。砂は伊勢湾、三河湾の湾奥、湾央で 20 % 以下、湾口部で 40 ~ 60 % に増加する。また、三河湾北部では 70 % 以上と高い。シルトは大部分で 40 ~ 80 % を示し、伊勢湾の松坂ー伊勢沖と三河湾北部では 10 % 以下と低い。粘土は伊勢湾の湾奥と湾央の西部で 40 % 以上と高く、伊勢湾の湾口部、三河湾の湾央、湾口部では 20 % 以下と低い。

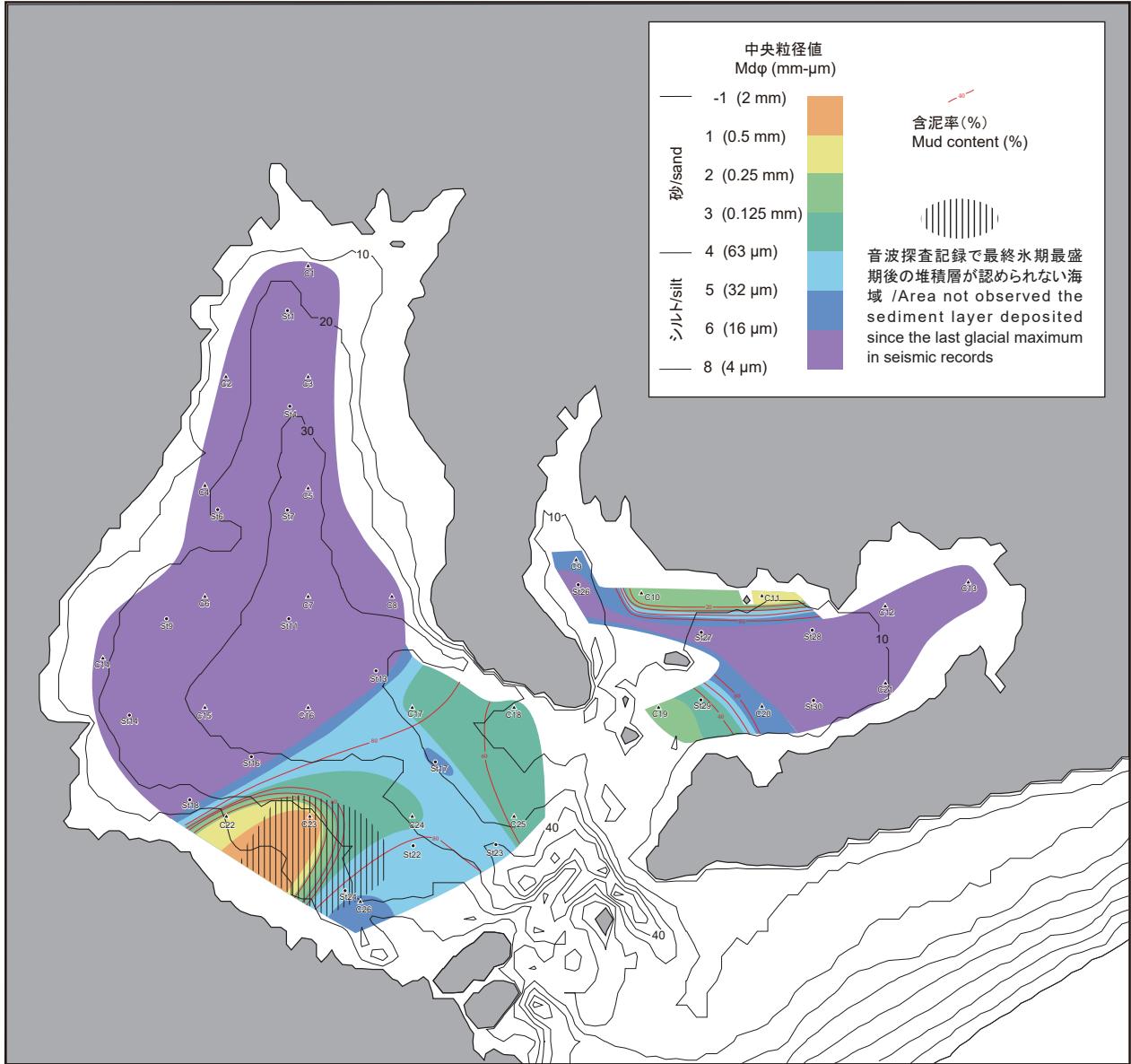
第 4 図に $Md\phi$ に対する水深と淘汰度を比較した結果を示す。また、これらの相関係数を第 2 表に示す。 4ϕ 以上のシルト質堆積物は 10 ~ 40 m の幅広い水深に分布する (第 4 図 A)。一方、 4ϕ 未満の砂質堆積物が分布する地点は水深 20 m よりも浅い海域に多いが、伊勢湾湾口部の 30 ~ 40 m でも確認される。淘汰度と比較すると (第 4 図 B), 大部分の地点の淘汰度は 1.0 ~ 2.5 で、顕著な $Md\phi$ との関係性は見られない。礫粒子を含む松坂ー伊勢沖の地点 (C23, 22) の淘汰度は 2.5 以上と悪く、一方、知多半島南端沖合の C18 と矢作古川河口沖合の C10 では 0.7 ~ 0.8 と良いことを示す。 $Md\phi$ と水深、淘汰度の間に相関は認められない (第 2 表)。

4.2 全有機炭素・全窒素・全硫黄濃度と有機炭素・窒素安定同位体比

伊勢湾、三河湾の TOC, TN, TS 濃度分布は、大局的には湾奥、湾央部で相対的に高く、湾中央部から湾口に向かって急激に減少する傾向を示す (第 5 図 A, B, C, 第 3 表)。詳細にみると、伊勢湾の TOC, TN, TS 濃度は湾奥部に比べて湾央部で高い。三河湾では TOC, TN 濃度は湾東部の豊橋沖合から湾央部にかけての海域で相対的に高く、湾北部の西尾沖合の海域では低い。TS 濃度は豊橋沖合から湾口に向かって徐々に減少する傾向を示す。各元素濃度と水深との間に関係性は認められないが (第 6 図 A, 第 4 表), $Md\phi$ とは正の相関を示し、 4ϕ 以下では元素濃度は 1.0 % 以下と低く、 4ϕ 以上になると細粒化に伴い元素濃度が増加する傾向を示す (第 6 図 B)。TOC, TN, TS 濃度間の関係はすべて明瞭な正の相関を示す (第 6 図 C, D, 第 4 表)。

TOC と TN の濃度から求めた全有機炭素全窒素量比 (C/N 比) は、主要部分では 9 ~ 7、伊勢湾の湾奥の木曾川河口沖、松坂ー伊勢沖、中山水道の周辺、三河湾北部沿岸で 10 以上と相対的に高いことを示す (第 5 図 D)。C/N 比は TOC, TN, TS 濃度と負の相関を示す (第 4 表)。

$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (第 5 図 E) は伊勢湾の湾央では $-22 \sim -20 \text{ ‰}$ を示し、湾口では $-23 \sim -22 \text{ ‰}$ に、また湾奥の木



第2図 伊勢湾、三河湾の底質分布図。粒度の中央粒径値、含泥率と音波探査記録で最終氷期最盛期以降の堆積層が認められない海域（佐藤 2025）を示す。等深度線は岸本（2000）を使用した。

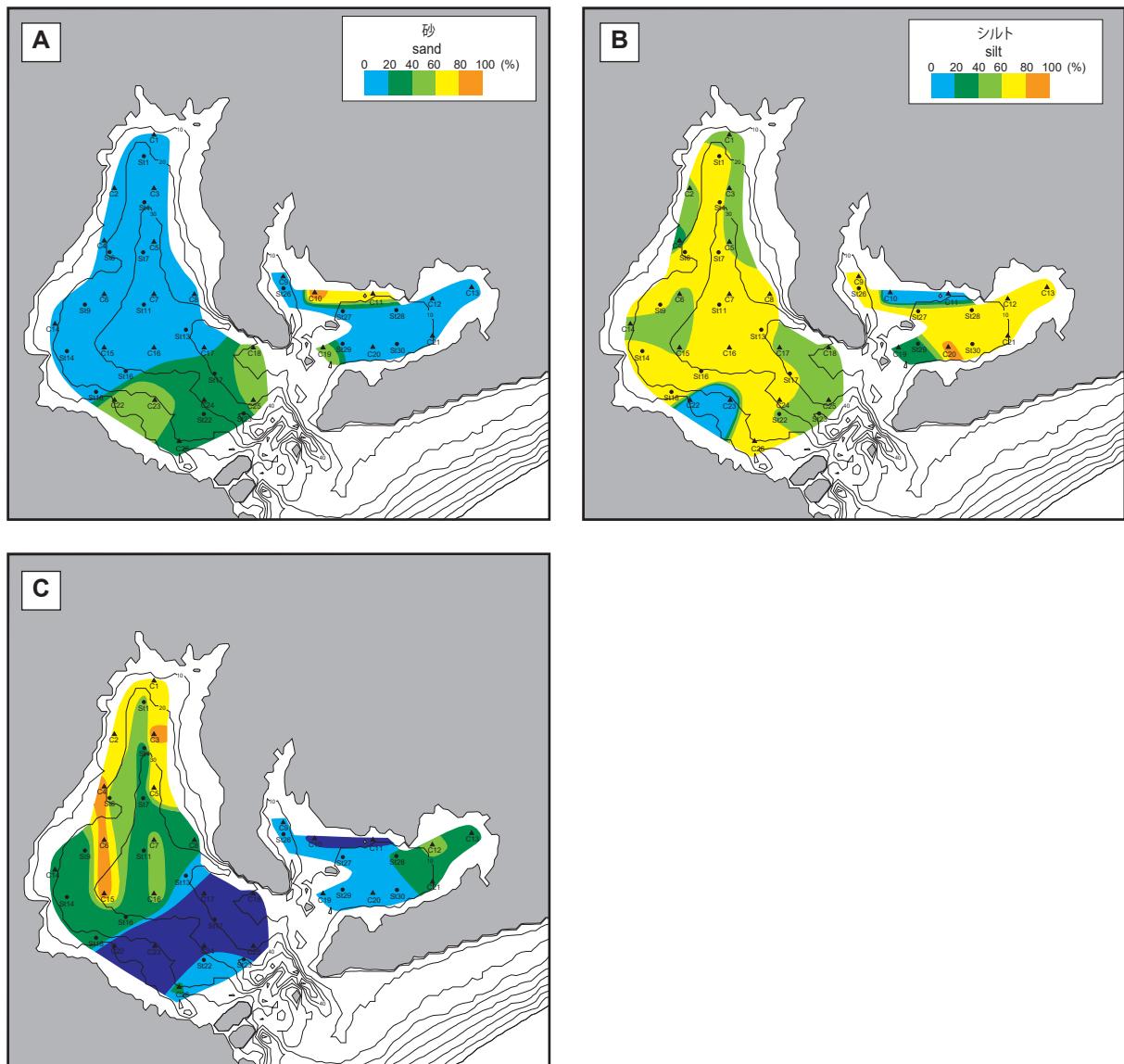
Fig. 2 Sedimentological map of Ise and Mikawa bays. The median grain size with phi scale, mud content, and areas where no sediment layers since the Last Glacial Maximum have been observed by seismic records (Sato *et al.*, 2025, this report). The topography based on Kishimoto (2000).

曾川河口沖では-24 %以下に減少する。三河湾では、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ は大部分で-22~20 ‰を示し、局的に湾央、湾口、北部で-23 ‰程度に減少する。 $\delta^{15}\text{N}$ （第5図F）は伊勢湾、三河湾の主要部では6~8 ‰を示し、伊勢湾の湾奥では4 ‰程度、中山水道周辺、伊勢沖合のSt22, C23では5~6 ‰へ減少する。また、三河湾では北部のC11, 12では8 ‰と高く、反対にC10では1.3 ‰と非常に低い値を示す。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ と $\delta^{15}\text{N}$ の間には正の相関が認められ、これら安定同位体比はTOC, TN, TS濃度とは正の相関を、C/N比とは負の相関を示す（第

7図、第4表）。

4.3 鉱物組成

本研究では脱塩処理を行っていない試料を用いて測定しているため、海水中の塩分が晶出し、すべてのサンプルに10 %程度のハライトが検出された（第5表）。堆積物中の鉱物組成の変化に注目するため、ハライトを除いた組成比を求めた（第8図、第5表）。カオリナイトが卓越する地点が最も多いが、松阪-伊勢沖では白雲母が卓越する地点が多い。また、三河湾の北部



第3図 砂、シルト、粘土の含有率分布図。レーザー回折・散乱法の結果は体積含有率、ふるい振盪法は重量含有率を示す。
A : 砂, B : シルト, C: 粘土。等深度線は岸本 (2000) を使用した。

Fig. 3 Distribution maps of sand, silt and clay contents. The results of laser diffraction and scattering indicate the volume content, while the sieve shaking method the weight content. A: sand, B: silt, C: clay. The topography based on Kishimoto (2000).

C10, 11 と中山水道周辺の St29 では石英が卓越する。Md ϕ と各鉱物の含有率を比較すると、石英では負の相関（第9図 A）を示す。カオリナイトは含有率 20 % を境に二つのグループに分かれ、20 % 以上のグループでは正の相関を示すが、20 % 未満では相関は見られない（第9図 B）。曹長石と白雲母との間では相関がみられない（第9図 C, D）。

4.4 放射性炭素年代

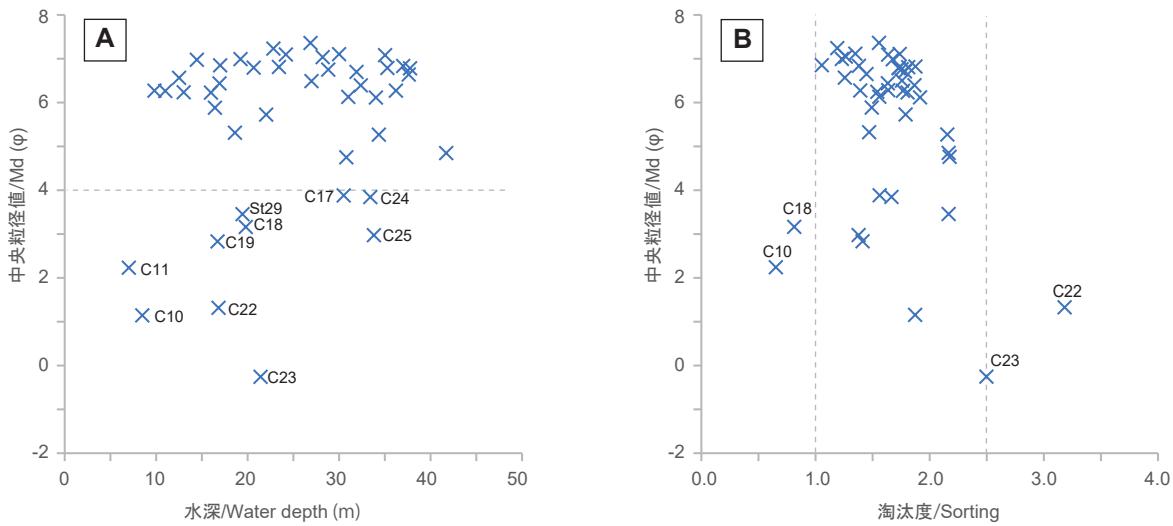
本研究では伊勢湾の伊勢市沖と伊良湖水道周辺の4地点から採取された貝化石6試料を用いて¹⁴C年代の分析を行った（第6表）。St22 のコア深度 5 ~ 6 cm の3

試料では標準現代炭素に対する試料炭素の¹⁴C濃度の割合（percent Modern Carbon, pMC）が100以上で、この結果は1950年以降に堆積したことを示す。St23 のコア深度 17 ~ 18 cm の試料から 80 cal BP の値が得られた。C22, 23 では表層 0 ~ 3 cm の試料からそれぞれ 1,470, 1,930 cal BP の値が得られ、他の2地点よりも古い年代を示す。

5. 考察

5.1 湾内の表層堆積物分布様式と堆積過程

伊勢湾、三河湾の粒度分布は、湾口部では 5 ϕ 以下と



第4図 中央粒径値と水深、淘汰度の関係図。A：水深と中央粒径値、B：淘汰度と中央粒径値。

Fig. 4 Relationship between median diameter, water depth and sorting. A: water depth and B: sorting versus median diameter.

第2表 表層堆積物の粒度指標との相関係数。太文字は $p < 0.05$ を示す。Table 2 Correlations of grain size properties and water depth in surface sediment samples. Bold numbers show $p < 0.05$.

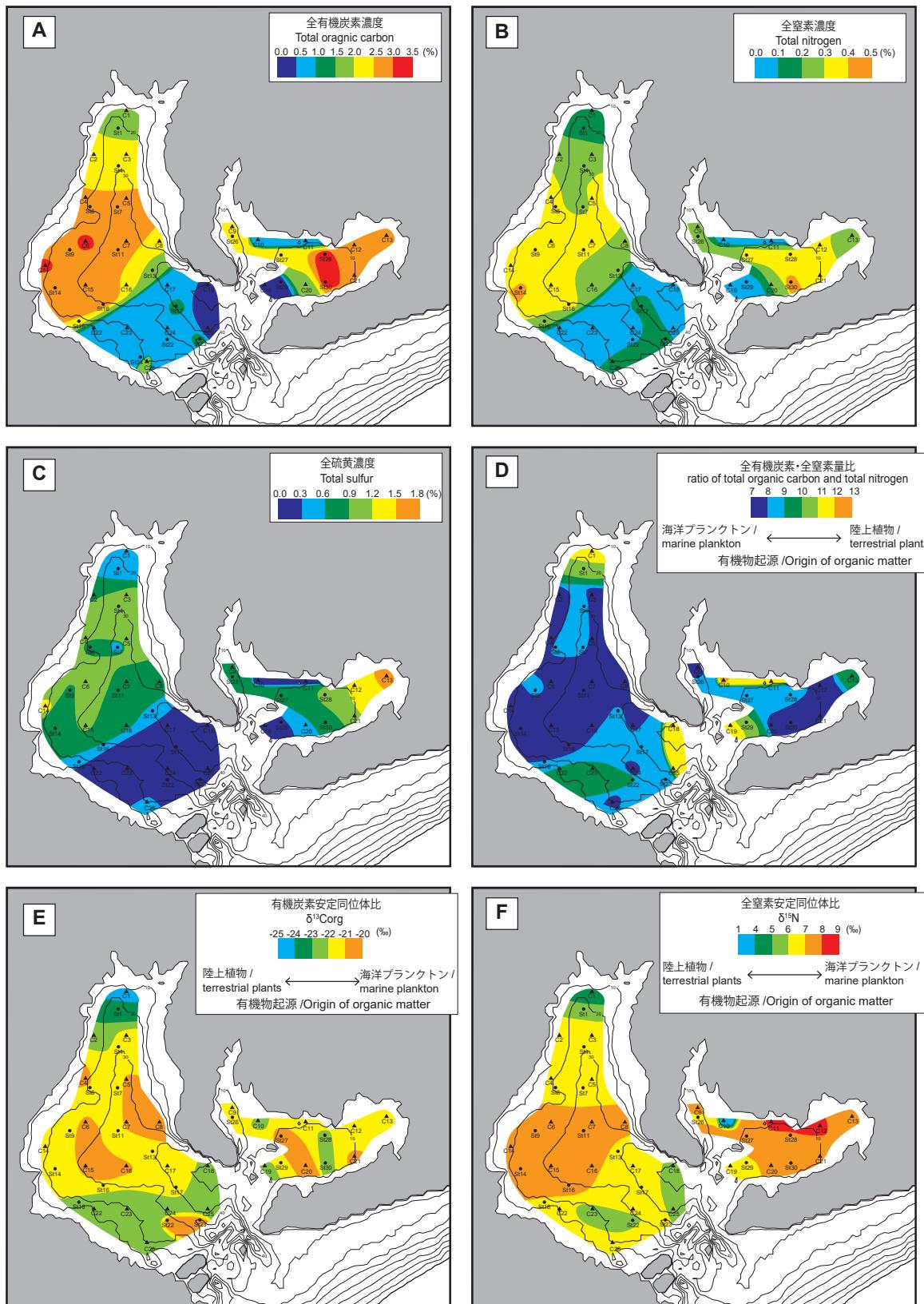
	中央粒径値 /Md	淘汰度 /sorting	含有率/content		
			砂/sand	シルト/silt	粘土/clay
水深/Water depth	0.26	0.18	-0.29	0.25	0.22
中央粒径値/Md		-0.31	-0.89	0.70	0.80
淘汰度/sorting			0.12	-0.13	-0.32
砂/sand				-0.77	-0.73
シルト/silt					0.22

相対的に粗粒で、湾央～湾奥部では 6ϕ 以上と細粒な堆積物が分布することを示す（第2図）。この粒度分布のパターンは、湾口部の堆積過程が波浪や潮流などの強い水利営力を受けて粗粒な堆積物が分布、一方で湾奥、湾央部では水利営力が弱くなり、停滞的な水理状態で細粒な堆積物が分布することを示す。伊勢湾、三河湾では、満潮時、干潮時を通して最も潮流が速いのは湾口部の伊良湖水道周辺で、湾口部から湾央部に向かって流速は急激に減衰する（林ほか, 2007；海上保安庁, 2004）。この湾口部で潮流が速い海域と粒度分布が示す砂質堆積物が分布する海域は調和的である。このことから、伊勢湾、三河湾の堆積環境は主に潮流の影響を受けており、湾口部では速い潮流によって砂質堆積物が分布し、湾央、湾奥部では潮流が減衰し、停滞的な水理環境であるために泥質堆積物が分布すると見える。

伊勢湾の 8ϕ よりも細粒な粘土の含有率は三河湾と比べると高く、特に湾奥部と湾央西部で 30 % 以上と高い（第3図 C）。伊勢湾奥部には濃尾平野の形成要因の一つである大量の土砂供給をもたらす木曽三川が流入

しており、これら河川から供給される碎屑物に細粒な粘土粒子が多く含まれていると考えられる。また、伊勢湾では夏季に湾奥部、湾奥部、湾口部に 3 つの残差循環流が生じ（佐藤, 1996），湾奥、湾央部の残差循環流と粘土粒子の高い分布域はよく一致する。これら結果は、木曽三川から供給された細粒な粘土粒子は湾奥、湾央部の残差循環流によって集積している可能性を示唆する。

伊勢湾南西部の松阪～伊勢沖では $-1 \sim 2\phi$ の淘汰の悪い極粗粒～中粒砂が分布する（第2図）。この粗粒砂分布域の表層堆積物に含まれる貝化石の ^{14}C 年代は約 2,000 cal BP を示し（第6表），この分布域の堆積速度は 1,000 年で数 cm と推定される。伊勢湾の湾奥、湾央部に分布する泥質堆積物の現在の堆積速度は $0.1 \sim 0.8 \text{ g/cm}^2/\text{yr}$ (Lu and Matsumoto, 2005) で、層厚にすると年間数 mm から数 cm の堆積物が堆積すると見積もられる。これら結果から、松阪～伊勢沖の粗粒砂分布域の堆積速度は湾奥～湾央部と比べると 100 分の 1 以下で、伊勢湾において非常に遅いと言える。また、この松阪



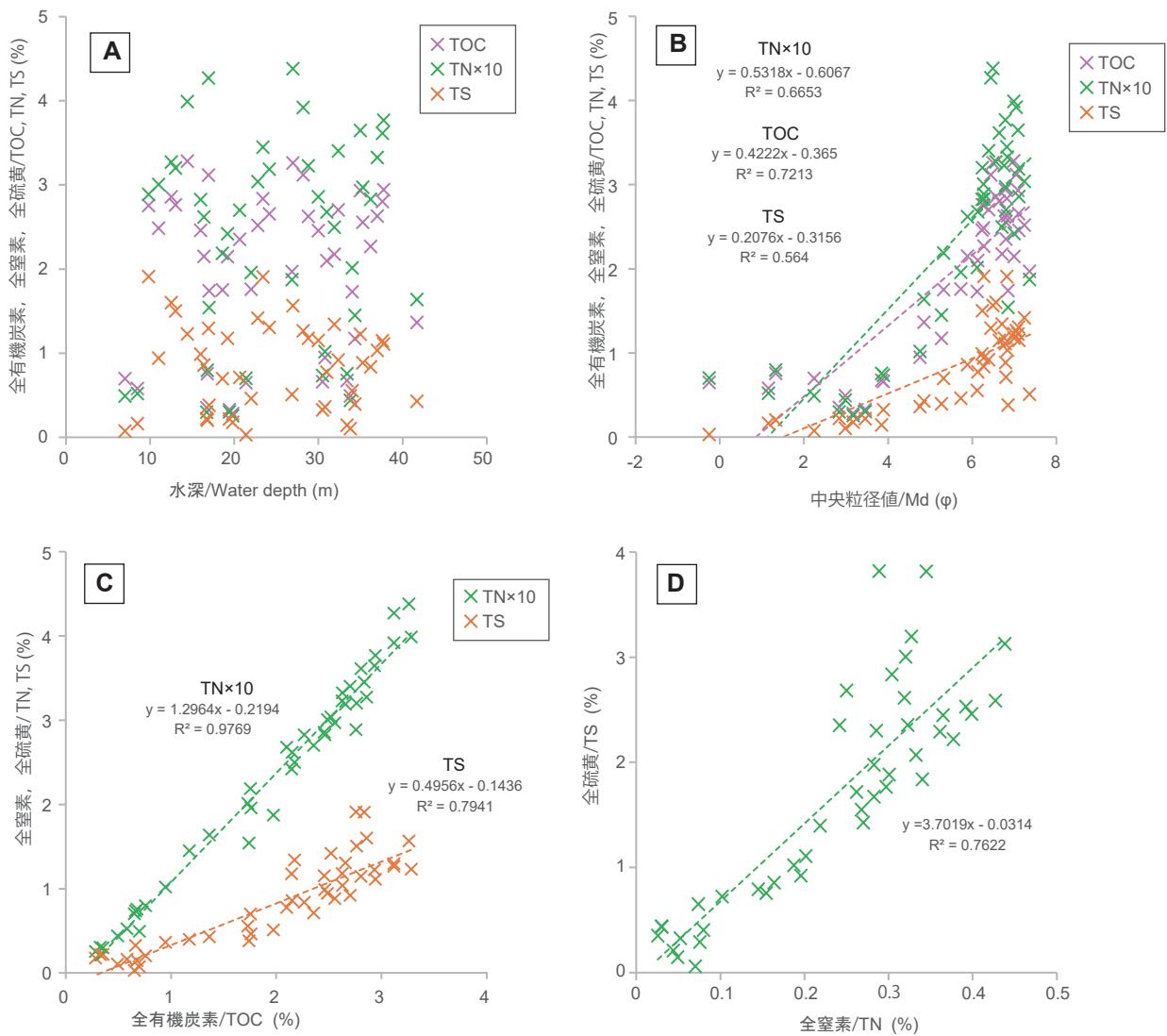
第5図 元素濃度と安定同位体比の分布図. A : 全有機炭素濃度, B: 全窒素濃度, C: 全硫黄濃度, D : 全有機炭素・全窒素量比, E: 有機炭素安定同位体比, F : 全窒素安定同位体比 . 等深度線は岸本 (2000) を使用した.

Fig. 5 Distribution maps of organic geochemistry properties. A: total organic carbon, B: total nitrogen and C: total sulfur concentrations, D: ratios of total organic carbon and total nitrogen, stable isotope ratios of E: organic carbon and F: nitrogen. The topography based on Kishimoto (2000).

第3表 元素濃度と安定同位体比.

Table 3 Element concentrations and stable isotopes of surface sediment samples.

採取地点/Site No.	全有機炭素 /TOC (%)	全窒素/TN (%)	全硫黄/TS (%)	全有機炭素全窒素 量比/C/N ratio	有機炭素安定同位体比 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} (\text{\textperthousand})$	全窒素安定同位体比 $\delta^{15}\text{N} (\text{\textperthousand})$
St1	1.97	0.19	0.51	10.5	-23.3	5.4
St4	2.17	0.25	1.34	8.7	-21.6	6.3
St6	2.66	0.32	1.31	8.3	-21.4	6.7
St7	2.55	0.30	0.88	8.6	-21.9	6.4
St9	2.63	0.32	1.18	8.1	-21.3	7.0
St11	2.94	0.38	1.11	7.8	-21.3	7.1
St13	1.73	0.20	0.55	8.6	-21.3	6.6
St14	3.26	0.44	1.56	7.4	-21.2	7.0
St16	2.70	0.34	0.92	7.9	-21.4	7.0
St17	1.17	0.14	0.40	8.1	-21.3	6.5
St18	2.35	0.27	0.71	8.7	-22.0	6.8
St22	0.95	0.10	0.36	9.3	-20.9	5.8
St23	1.36	0.16	0.43	8.3	-20.1	6.5
St26	2.46	0.28	0.99	8.7	-21.7	6.6
St27	2.49	0.30	0.94	8.3	-20.9	7.6
St28	3.28	0.40	1.23	8.2	-21.0	7.5
St29	0.33	0.03	0.22	10.8	-21.7	6.3
St30	3.12	0.43	1.29	7.3	-20.8	7.1
C1	1.74	0.15	0.38	11.3	-24.9	4.3
C2	2.15	0.24	1.18	8.9	-22.1	6.5
C3	2.46	0.29	1.15	8.6	-21.1	6.6
C4	2.52	0.30	1.42	8.3	-20.9	6.9
C5	2.63	0.33	1.03	7.9	-20.6	7.0
C6	3.12	0.39	1.27	8.0	-20.5	7.5
C7	2.80	0.36	1.15	7.8	-20.6	7.0
C8	2.10	0.27	0.78	7.8	-20.5	7.1
C9	2.15	0.26	0.86	8.2	-21.0	7.0
C10	0.70	0.05	0.07	14.2	-21.6	1.4
C11	0.58	0.05	0.16	11.1	-21.1	8.3
C12	2.86	0.33	1.60	8.7	-21.1	8.2
C13	2.76	0.29	1.91	9.5	-21.8	7.8
C14	2.83	0.34	1.91	8.2	-21.1	7.1
C15	2.93	0.36	1.22	8.0	-20.8	7.4
C16	2.27	0.28	0.84	8.0	-20.8	7.4
C17	0.66	0.07	0.33	9.0	-21.4	6.2
C18	0.28	0.03	0.18	11.1	-21.9	5.7
C19	0.35	0.03	0.22	11.8	-21.6	6.4
C20	1.75	0.22	0.70	8.0	-20.8	7.8
C21	2.76	0.32	1.50	8.6	-20.8	8.0
C22	0.76	0.08	0.20	9.5	-22.6	6.2
C23	0.65	0.07	0.03	9.3	-22.7	6.0
C24	0.67	0.08	0.15	8.9	-21.7	6.5
C25	0.49	0.04	0.10	11.2	-22.0	5.7
C26	1.76	0.20	0.46	9.0	-22.5	6.5



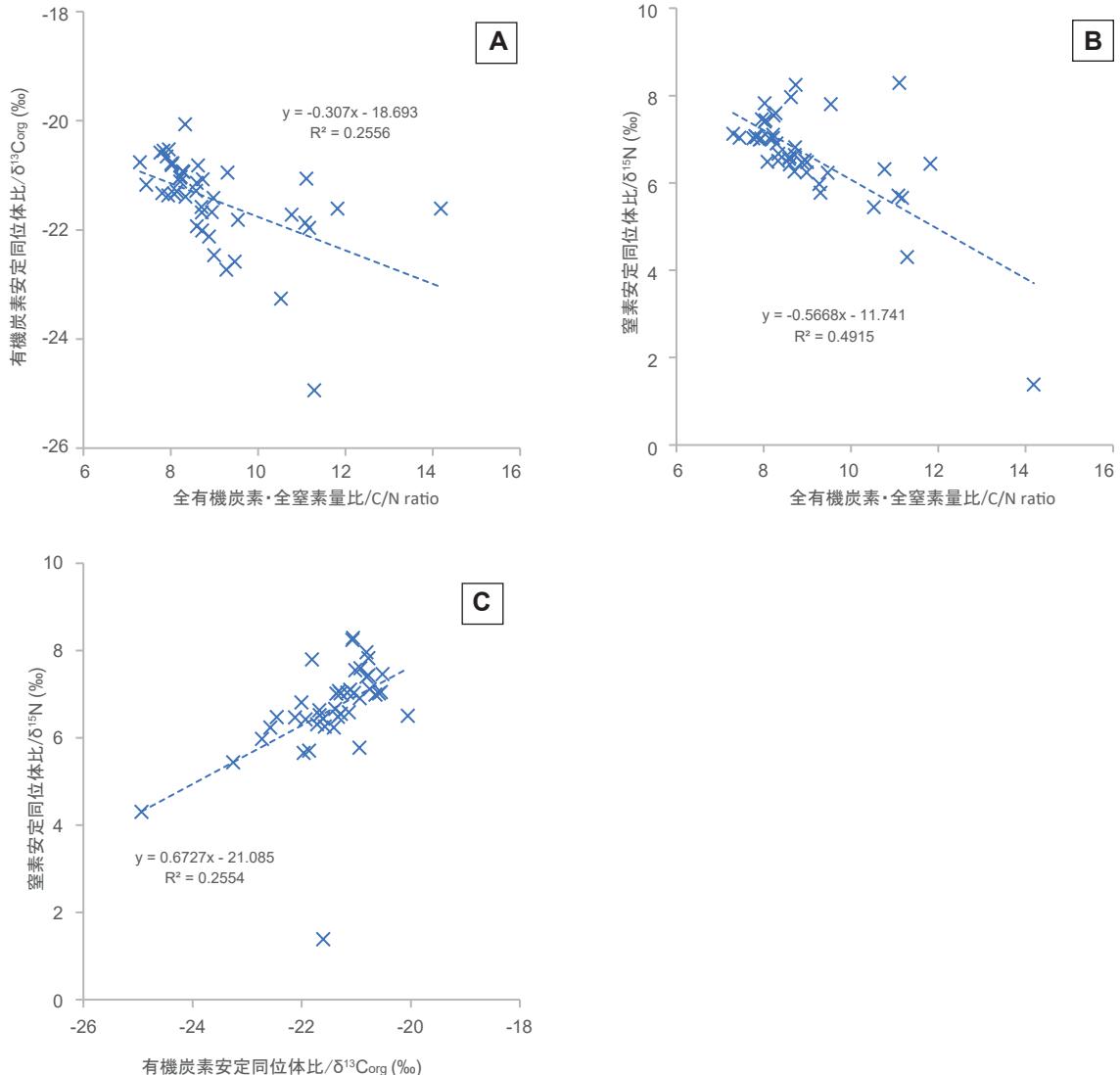
第6図 元素濃度、水深、粒度の関係図。A:元素濃度と水深、B:元素濃度と粒度、C:全有機炭素濃度と全窒素、全硫黄濃度、D:全窒素濃度と全硫黄濃度。

Fig. 6 Relationships between element concentrations, water depth and grain size. A: water depth and B: median diameter versus element concentrations. C: total organic carbon versus total nitrogen and sulfur. D: total sulfur versus total nitrogen.

第4表 表層堆積物の元素特性との相関係数。太文字は $p < 0.05$ を示す。

Table 4 Correlations of elemental properties in surface sediment samples. Bold numbers show $p < 0.05$.

	TOC	TN	TS	C/N ratio	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$	$\delta^{15}\text{N}$
水深/Water depth	0.09	0.14	-0.04	-0.44	0.25	0.05
中央粒径値/Md	0.85	0.82	0.75	-0.60	0.19	0.33
淘汰度/sorting	-0.16	-0.12	-0.19	-0.29	-0.01	0.23
TOC	0.99	0.89	-0.69	0.32	0.48	
TN			0.87	-0.76	0.40	0.52
TS				-0.60	0.37	0.53
C/N ratio					-0.51	-0.70
$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$						0.51



第 7 図 全有機炭素窒素量比、有機炭素・窒素安定同位体比の関係図。全有機炭素・全窒素量比と A: 有機炭素安定同位体比、B: 窒素安定同位体比との関係。C: 有機炭素安定同位体比と窒素安定同位体比との関係。

Fig. 7 Relationships of ratios of total organic carbon and total nitrogen and stable isotopes in surface sediments. Ratios of total organic carbon and total nitrogen versus A: stable isotope ratios of organic carbon and B: stable isotope ratios of nitrogen. C: stable isotope ratios of organic carbon versus nitrogen.

—伊勢沖の粗粒砂分布域は音波探査記録で最終氷期最盛期後に形成された南陽層、濃尾層が確認されない海域、佐藤 (2025) と重なる（第 2 図）。本研究ではこの海域に完新世に堆積した堆積物が認められるが、上記したように堆積速度が非常に遅く、その層厚は薄いため、音波探査記録では認められないと考えられる。この堆積速度が非常に遅い理由として、この海域の水深は周辺よりも浅く、波浪などの影響を受けやすく、粗粒な粒子が分布し、堆積速度が非常に遅い、あるいは堆積と浸食を繰り返している可能性が考えられる。

三河湾の北部 (C10, C11) では $-1 \sim 3 \varphi$ の極細粒～細粒砂が分布し、三河湾内で粗粒な堆積物が分布することを示す。C10 の北西には矢作川、北東には矢作古

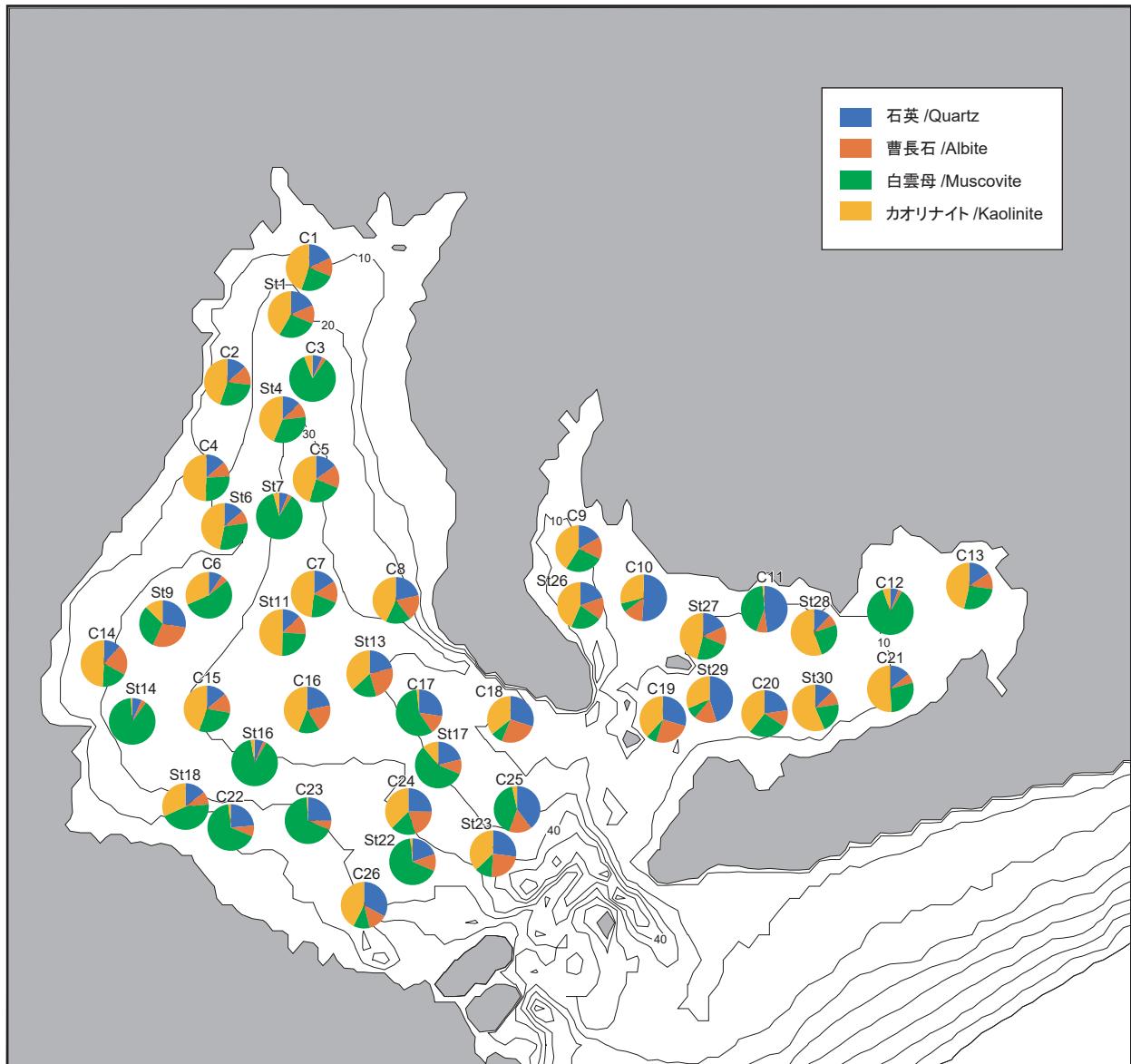
川の河口が位置し、これら河口周辺ではデルタ地形が認められる。森山 (1976) はこれら河口デルタ地形における粒度分布と堆積過程について議論しており、河口前面の比較的平坦な地形を示すデルタの頂置面では淘汰の良い 3φ 以上の砂質堆積物が分布し、これよりも沖合に位置するデルタの斜面から底置面では $3 \sim 7 \varphi$ の砂質、泥質堆積物が分布することを示す。また浅い頂置面では潮流が速いため、淘汰のよい粗粒砂が堆積していることが示されている。この結果が示すように C10 が位置する矢作川、矢作古川の河口周辺ではこれら河川からの供給作用の影響を受けてデルタ地形が発達し、相対的に粗粒な堆積物が分布していると考えられる。さらに粒度分析結果は C10 の堆積物が淘汰度の

伊勢湾・三河湾における海底堆積物と海洋環境

第5表 鉱物組成比.

Table 5 Mineral compositions of surface sediment samples.

採取地点 /Site No.	ハライトを除いた含有率/Contents excluding Halite				全データ/Contents of all data				
	石英 /Quartz	曹長石 /Albite	白雲母 /Muscovite	カオリナイト /Kaolinite	石英 /Quartz	曹長石 /Albite	白雲母 /Muscovite	カオリナイト /Kaolinite	ハライト /Halite
St1	18.5	12.9	27.0	41.6	17.7	12.4	25.9	39.8	4.3
St4	12.7	10.5	32.9	43.9	12.2	10.1	31.7	42.2	3.8
St6	13.8	8.9	30.5	46.8	12.8	8.3	28.5	43.6	6.9
St7	6.1	3.0	86.7	4.3	5.9	2.9	83.8	4.1	3.3
St9	27.8	29.0	30.6	12.6	24.0	25.1	26.5	10.9	13.4
St11	12.9	13.2	24.2	49.8	11.7	11.9	22.0	45.2	9.2
St13	21.1	24.3	17.5	37.0	20.5	23.7	17.0	36.0	2.8
St14	6.7	3.4	89.0	0.9	6.1	3.1	81.4	0.8	8.6
St16	6.2	2.2	88.9	2.7	6.0	2.1	87.0	2.6	2.1
St17	21.0	10.4	57.5	11.1	20.7	10.2	56.6	10.9	1.6
St18	14.4	9.1	44.6	31.8	13.9	8.8	43.0	30.7	3.7
St22	19.7	11.8	66.9	1.6	19.5	11.7	66.3	1.6	1.0
St23	27.0	23.9	12.0	37.1	26.1	23.2	11.6	35.9	3.2
St26	19.6	15.4	21.5	43.6	18.5	14.6	20.3	41.2	5.4
St27	17.9	13.4	22.8	45.9	17.3	12.9	21.9	44.2	3.7
St28	12.0	7.6	25.0	55.5	11.2	7.1	23.3	51.7	6.7
St29	45.2	15.7	7.8	31.2	45.0	15.7	7.8	31.1	0.5
St30	12.7	9.9	21.0	56.4	11.3	8.8	18.8	50.4	10.7
C1	18.2	12.8	24.3	44.6	17.8	12.5	23.7	43.6	2.3
C2	13.5	13.3	28.4	44.8	13.1	12.9	27.6	43.4	3.1
C3	6.8	2.9	84.4	5.9	6.7	2.9	82.9	5.7	1.8
C4	13.6	10.5	26.2	49.8	13.0	10.0	25.0	47.5	4.4
C5	15.1	16.0	23.4	45.5	14.2	15.0	22.0	42.8	6.0
C6	9.4	4.9	54.3	31.5	8.9	4.6	51.5	29.9	5.1
C7	16.1	15.1	20.9	48.0	15.4	14.4	20.0	45.9	4.4
C8	21.5	18.0	17.4	43.1	20.9	17.4	16.9	41.9	2.9
C9	17.0	15.2	26.8	41.0	16.6	14.9	26.2	40.1	2.2
C10	51.1	13.8	6.2	28.9	50.7	13.7	6.1	28.7	0.7
C11	47.9	7.7	43.2	1.2	47.7	7.7	43.1	1.2	0.3
C12	5.6	2.7	86.4	5.3	5.5	2.7	84.6	5.2	2.1
C13	15.5	11.6	26.6	46.2	15.1	11.3	25.9	45.0	2.8
C14	11.9	21.0	18.0	49.1	11.4	20.2	17.3	47.3	3.7
C15	14.0	13.6	27.9	44.5	13.3	12.9	26.5	42.2	5.1
C16	21.8	19.3	14.9	44.0	20.9	18.5	14.3	42.1	4.2
C17	27.4	13.1	57.8	1.7	27.2	13.0	57.5	1.7	0.5
C18	30.0	26.2	8.1	35.7	29.4	25.8	8.0	35.1	1.7
C19	29.6	25.1	7.1	38.2	28.6	24.3	6.8	36.9	3.4
C20	22.7	11.7	26.4	39.2	22.2	11.4	25.9	38.4	2.1
C21	14.1	6.7	28.5	50.7	13.7	6.5	27.8	49.4	2.7
C22	23.7	7.7	66.9	1.8	23.5	7.6	66.5	1.7	0.6
C23	25.1	6.4	67.7	0.9	24.9	6.3	67.2	0.9	0.7
C24	25.2	20.1	17.3	37.5	25.0	19.9	17.2	37.2	0.7
C25	39.6	16.0	40.9	3.5	39.3	15.8	40.6	3.5	0.9
C26	32.9	13.2	11.3	42.5	32.3	13.0	11.1	41.7	2.0



第8図 鉱物組成比図。等深度線は岸本（2000）を使用した。

Fig. 8 Map of mineral compositions. The topography based on Kishimoto (2000).

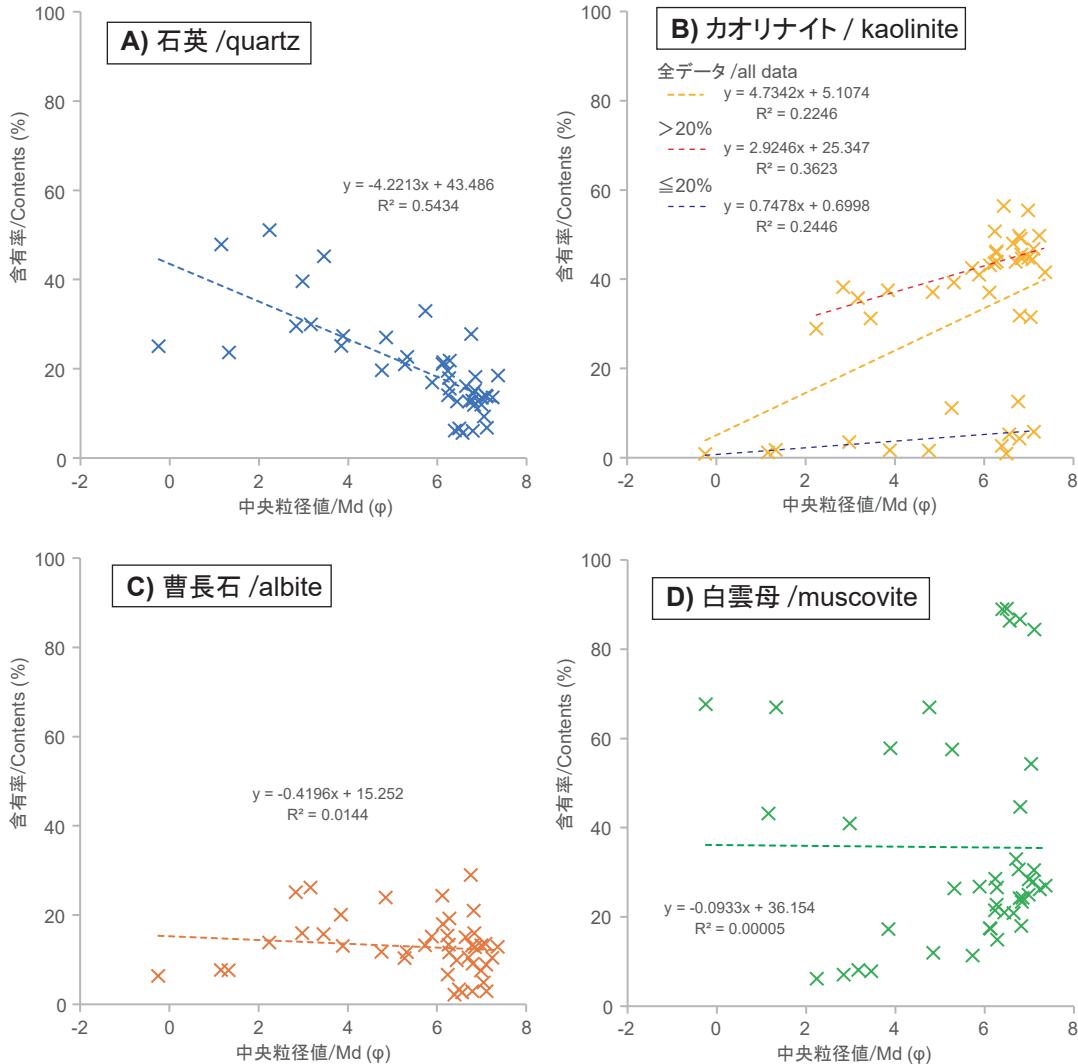
良いことを示すことから（第4図B），この地点は矢作古川の供給作用に加えて、潮流の影響も受けているものと考えられる。一方で、C11の周辺には周囲1km未満の梶島、沖島、前島などの島や岩礁が存在する。これらの島や岩礁の周辺では水深は浅くなり、海底への波浪の影響が強くなり、かつ地形が複雑になるため島の間を流れる潮流は速くなる。このような地形的な要因によって、波浪や潮流が堆積環境に与える影響が強くなり、粗粒な砂質堆積物が分布していると考えられる。

5.2 有機元素指標による海底環境

TOC, TN濃度は堆積物中の有機物量の指標として用

いられる。表層堆積物のTOC, TN濃度分布は湾奥、湾奥部で相対的に高く、湾口部で減少することを示す（第5図A, B）。これら元素濃度とMd ϕ は正の相関を示し、4 ϕ 未満の砂質堆積物では元素濃度が低く、4 ϕ 以上の泥質堆積物で細粒化に伴い濃度が増加する傾向を示す（第6図B, 第4表）。有機物は泥粒子に吸着しやすい性質があるため（Mayer 1994a, b; Volkman *et al.* 2000），泥質堆積物が分布する湾奥、湾央部で有機物量が相対的に多いといえる。

堆積物中のパイライト（FeS₂）は、海水に含まれる硫酸イオンを用いて、酸素が少ない還元的な海洋環境下で活動する硫酸還元バクテリアが有機物分解することによって形成されるため（Berner, 1983），海洋堆積物



第9図 鉱物組成比と中央粒径値の関係図. A : 石英, B : カオリナイト, C: 曹長石, D : 白雲母.

Fig. 9 Relationships between mineral composition and median diameter. A: quartz, B: kaolinite, C: albite and D: muscovite.

中の TS 濃度は海底環境の還元状態の指標となる。伊勢湾、三河湾の表層堆積物の TS 濃度は TOC、TN 濃度と同様に、湾口部と比べて湾奥、湾央部で高く（第5図 C）、 $Md\phi$ と正の相関を示す（第6図 B、第4表）。TOC、TN 濃度が示すように湾奥、湾央部では堆積する有機物量が多い。有機物分解に酸素が使用されるため、有機物量が多くなると底層の溶存酸素濃度は減少しやすくなる。これに加えて、潮流速が遅い湾奥、湾央部では停滞的な水理状態のために底層へ供給される酸素が少なく、反対に潮流速が速い湾口部では海水交換が活発で底層への酸素供給が多いと考えられる。これらのことから、伊勢湾、三河湾の湾奥、湾央部の底層では有機物量が多く、酸素の少ない還元的な環境であるためにパイライト生成量が多く、その結果、TS 濃度は高くなり、反対に湾口部では酸化的な環境でパイライト生成が少なり、TS 濃度が低くなることを示していると考え

られる。

清家・天野（2020）は MC による試料採取の際に同時に採取されたコア試料を用いて X 線 CT 測定と粒度分析を行った。その結果、伊勢湾の湾奥部と三河湾の X 線 CT 画像では泥質堆積物中の葉理構造が確認され、底生生物による堆積物の攪拌作用の影響が小さいため、初期の堆積構造が保存されていると考えられる（清家・天野、2020）。この結果は底層では富栄養化や貧酸素状態のため、底生生物の活動が低いことを示唆し、元素濃度から推定された底層の酸化還元状態の変化と調和的である。

沿岸域の堆積物中の有機物は陸上と海洋に起源を持つものが混在しており、C/N 比、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ はこの起源の指標となる。陸上の維管束植物と海洋のプランクトンの値は、C/N 比ではそれぞれ 20 以上と 5 ~ 6 (Bordowskiiy, 1965a, b)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ではそれぞれ -26 ~ -30

第6表 放射性炭素年代.

Table 6 Results of radiocarbon dating.

採取地点/Site No.	コア深度/Core depth (cm)	測定試料 /material	放射性炭素年代 /Conventional radiocarbon age (BP)	較正年代/Calibrated age (cal BP)		beta ID
				one sigma	two sigma	
St22	5-6	shell	111.02 ± 0.41 pMC*			580896
St22	5-6	shell	113.96 ± 0.43 pMC*			580897
St22	5-6	shell	109.51 ± 0.41 pMC*			580898
St23	17-18	shell	470 ± 30	42 - 115	1 - 149	580895
C22	-	shell	1920 ± 30	1420 - 1513	1376 - 1546	580899
C23	-	shell	2320 ± 30	1888 - 1976	1848 - 2032	580900

*この結果は標準現代炭素に対する測定試料の¹⁴C濃度の割合 (pMC;percent Modern Carbon)が100以上で、1950年以降に堆積したことを見示す。The values are not age, shown in pMC.

%と-18~-24‰, δ¹⁵Nはそれぞれ-2~2と6~9を示す (Fry and Sherr, 1984; Currin *et al.*, 1995; Deegan and Garritt, 1997). 伊勢湾, 三河湾のC/N比は7~13, δ¹³Corgは-20~-24‰, δ¹⁵Nは1~9の間での変化を示し, C/N比は湾央部に比べて湾奥部と湾口部で高く, 反対にδ¹³Corgとδ¹⁵Nは湾奥部と湾口部で低いことを示す(第5図D, E, F). またC/N比, δ¹³Corg, δ¹⁵Nは互いに相関があることを示す(第4表). これら結果は湾奥部と湾口部では湾央部に比べて陸上植物起源の有機物寄与が相対的に高くなることを示す。

三河湾北部のC10のC/N比は周辺に比べて高く, δ¹³Corgとδ¹⁵Nは低く, 陸上植物起源の有機物寄与が高いことを示す. 粒度結果が示すようにC10の地点は矢作川, 矢作古川の供給作用を受けていることを示唆する. 有機物も同様に, これら河川の供給作用によって陸上植物起源有機物の寄与が高くなっていることを示唆する.

伊勢湾, 三河湾の師崎, 中山水道周辺と三河湾北部のC11でもC/N比は周辺よりも高いことを示す. しかし, これら海域周辺に河口ではなく, 粒度結果から潮流の影響を受けて粗粒な砂質堆積物が分布する海域といえる. 沿岸域では堆積物粒子が粗粒化するに伴い, 木本などの陸上植物由来の比較的大きな有機物の破片が混在し, C/N比が高くなることがある(Bianchi, 2007). このことから, 師崎・中山水道周辺の潮流速が速い海域では粗粒な碎屑物粒子と一緒に比較的大きな陸上植物破片も堆積していると考えられる.

5.3 鉱物組成による碎屑物起源の推定

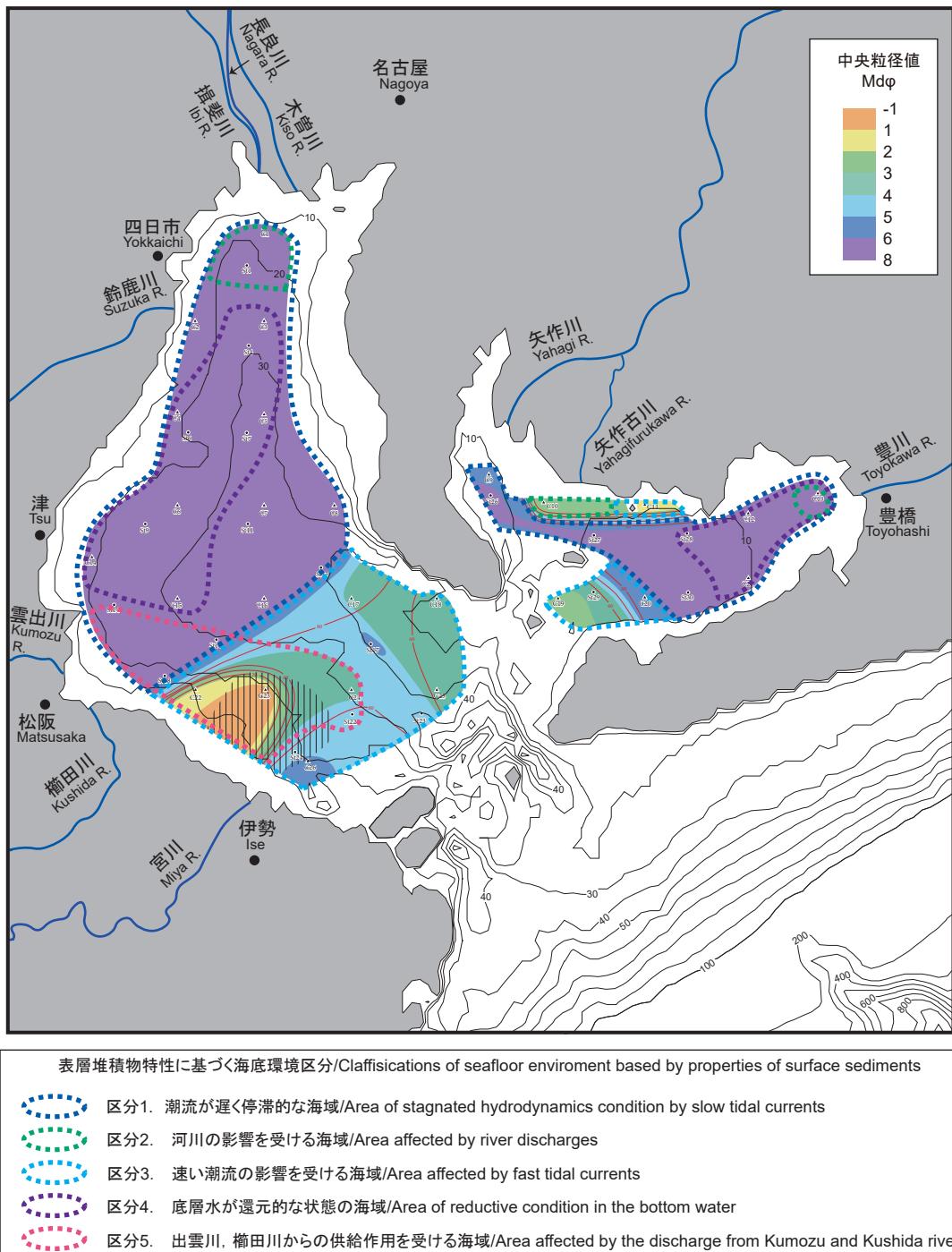
鉱物組成の分析結果を基に, 堆積物中の岩石性碎屑物粒子の起源について検討した. 鉱物の含有率とMdφを比較すると, 石英と負の相関を, カオリナイトが20%以上と相対的に高い地点では正の相関を示す(第9図A, B). 石英は風化しにくい鉱物であるため, 堆積物中でも粗粒な粒子として存在していると考えられる. 一方で, カオリナイトは風化作用によって生成される

粘土鉱物で, その粒子は細粒であるため, 細粒な堆積物に多く含まれるといえる. このように石英とカオリナイトは粒径に依存するため, 泥質堆積物分布域では石英含有率は低く, カオリナイトが卓越する地点が多いといえる. 一方で, カオリナイトが20%未満の地点の大部分は伊勢湾の松阪-伊勢沖に集中しており, これら地点では白雲母の含有率が50%を超える(第8図). 白雲母は, 花崗岩やペグマタイトなどの火成岩や熱水変質を受けた砂岩, 泥岩を母岩とする変成岩などで見られる. 伊勢湾, 三河湾周辺の地質は広く完新統, 更新統の堆積物からなる平野部が広がっているが, 中央構造線の北側には領家帯の花崗岩が分布する(西岡ほか, 2010). この領家帯の花崗岩が分布する地域は出雲川や櫛田川の流域を含むことから, これらの河川を通じて白雲母を含む領家帯花崗岩起源の岩石性碎屑物が流入し, 伊勢湾南西部の松阪-伊勢沖に堆積していると考えられる. この結果は, C/N比が松阪-伊勢沖で高く, 出雲川, 櫛田川からもたらされた陸上植物起源の有機物が堆積していると考えられることと調和的な結果である.

5.4 現在の伊勢湾, 三河湾の海底環境

上記した粒度, 元素, 鉱物の分析結果を基に伊勢湾と三河湾の海底環境を5つに区分して第10図に示した. 粒度分布(第2図)は伊勢湾, 三河湾の表層堆積物の大部分はシルトからなり, 湾奥, 湾奥部では比較的細粒な6φ以上の極細粒~細粒シルトが堆積し, 湾口部で粗粒化することを示す. この分布から, 湾奥, 湾奥部は潮流速が遅く, 停滞的な海底環境, 一方で湾口部は相対的に速い潮流速が影響を及ぼす環境と2つに区分される(第10図, 区分1, 2). さらに, 停滞的な海域のTOC, TN, TS濃度が高い湾奥~湾央部は, 有機物負荷が大きく, 酸素の少ない還元的な海底環境(第10図, 区分3)に区分できる.

三河湾の北部, 矢作古川河口ではデルタ地形が発達し, デルタの頂置面に特徴的な淘汰がよい砂質堆積物



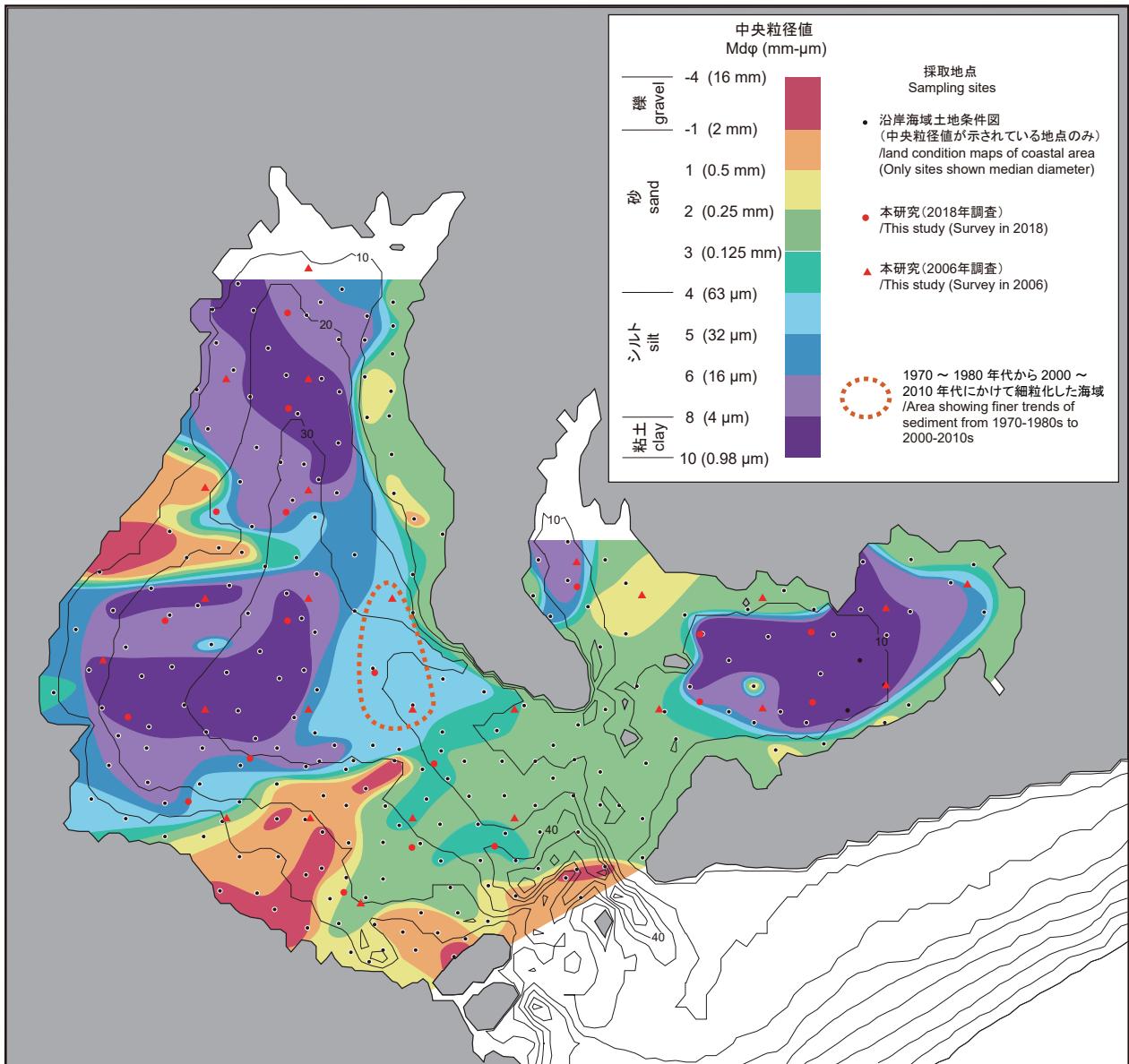
第10図 表層堆積物特性による海底環境区分図。等深度線は岸本（2000）を使用した。

Fig. 10 Map of marine environment in Ise and Mikawa bays based on physical and chemical properties of surface sediments. The topography based on Kishimoto (2000).

(森山, 1976) が分布することから、これら河口に位置する C10 周辺は河川からの供給作用と速い潮流の影響を受けていると言える。この結果に加えて、有機物起源の指標となる C/N 比と $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, $\delta^{15}\text{N}$ の分布(第 5 図 D, E, F) は、伊勢湾の湾奥部と、三河湾の湾奥部と北部の矢作古川の河口沖合では陸上植物起源の有機物寄与が高くなることを示し、これら海域は河川からの供給

作用の影響を強く受ける環境(第 10 図、区分 4) と区分することができる。

鉱物組成分布は伊勢湾の松阪-伊勢沖で白雲母の含有率が高いことを示す(第 8 図)。この海域に流入する雲出川、櫛田川の流域には白雲母を多く含む領家帶花崗岩が分布することから、松阪-伊勢沖の白雲母の含有率が高い海域はこれら河川からの供給作用の影響を



第11図 1970～1980年代の伊勢湾、三河湾における表層堆積物の粒度分布図。沿岸海域土地条件図「四日市」、「津東部」、「豊橋」、「伊良湖」、「蒲郡」、「鳥羽」、「半田」、「師崎」、「答志」、「松阪」(国土地理院, 1973, 1973, 1973, 1974, 1974, 1974, 1976, 1978, 1978, 1984) の粒度を基に作成した。本結果の粒度分布と比較のために、本結果の地点を赤の丸または三角で示す。等深度線は岸本(2000)を使用した。

Fig. 11 Distribution map of grain size of Ise and Mikawa bays in 1970–1980s. This map were compiled by grain size data shown in land condition maps of coastal area in Yokkaichi, east part of Tsu, Toyohashi, Irago, Gamagori, Toba, Handa, Morozaki, Toshi and Matsusaka (Geographical Survey Institute, 1973, 1973, 1973, 1974, 1974, 1974, 1976, 1978, 1978, 1984). In order to comparing with the grain size distribution in this study, the sampling sites in this study are shown in red circle and triangle. The topography based on Kishimoto (2000).

受けている環境（第10図、区分5）と区分できる。

5.5 1970年代以降の粒度分布変化

1973年から1984年にかけて堆積物採取と音波探査調査を実施し、その結果を用いて作成された沿岸海域土地条件図の堆積物の中央粒径値と音波探査記録による底質を基に伊勢湾、三河湾における表層堆積物の粒度分布図を作成した（第11図）。本研究と粒度分析方

法が異なるため、中央粒径値の値に差が生じている可能性がある。また、沿岸海域土地利用図の粒度分布は本研究よりも採取地点数が多いため、空間的な精度も高いといえる。そのため、本研究と沿岸海域土地利用条件図の粒度分布を単純に比較することは難しいため、各分布における相対的な空間変化の違いについて説明する。

本研究と沿岸海域土地利用条件図の粒度分布は、相

対的に伊勢湾、三河湾の湾奥～湾央部では 5φ よりも細粒な堆積物が、湾口部ではそれよりも粗粒な堆積物が分布することを示す。伊勢湾の松坂－伊勢沖と三河湾の矢作古川河口沖合での粗粒化も両者で認められる。これらの一致は、前述したように伊勢湾、三河湾では主として潮汐流が粒度分布に影響を与え、部分的に波浪や河川流が影響していることを示し、沿岸海域土地利用図の試料採取が行われた1970～1980年代から現在まで変化していないことを示唆する。

一方で、知多半島南部の西方海域では両者に違いが認められる。沿岸海域土地利用図では 5φ の粗粒シルトが分布し、 $6\sim10\varphi$ が分布する湾奥、湾奥部よりも粗粒であることを示す。しかしながら、本研究の粒度分布はこの海域では $6\sim8\varphi$ が分布し、湾奥、湾奥部と同程度の粒度であることを示す。これら結果は、試料採取が行われた1970～1980年代から2000～2010年代にかけて知多半島南部の西方海域では堆積物が細粒化した可能性を示す。この細粒化の原因として、陸域からの粗粒碎屑物の減少、または水理営力の減少が考えられる。上記したように、伊勢湾の粒度分布は潮汐の影響を強く受けて変化している。そのため、1970～1980年代以降に湾内の潮流速度が減少し、細粒化した可能性が考えられる。伊勢湾と同様に、閉鎖的な内湾環境での細粒化の原因として、埋め立てなどの人為的地形改変が報告されている。例えば、斎藤・茅根（1991）は東京湾では1960年代から1980年代にかけて埋め立てに伴い海水交換量と潮流速の減少し、富津岬周辺で細粒化したことを示した。また、天野ほか（2013）は岡山県児島湾で湾奥部に締め切り堤防が形成されることによって、湾口部での潮流速が低下し、底質が泥質化したことを報告している。伊勢湾の海岸の大半は埋め立てや浚渫によって人工的に改変された人工海岸で、その割合は1978年では56.5%であったが、1996～1997年には69.3%へと増加している（国土交通省中部地方整備局、2008）ため、このような人為的な地形改変が1970～1980年代から2000～2010年代にかけての底質の細粒化に関係した可能性が考えられる。

また、沿岸海域土地利用図の粒度分布は鈴鹿沖では明らかに湾奥～湾奥部よりも粗粒な砂質堆積物が分布することを示す。一方で、本研究ではこの海域に採取地点がなく、分布変化を示すことができない。しかしながら、音波探査記録結果、佐藤（2025）では、鈴鹿沖では松坂－伊勢沖と同様に冲積層の認められない海域となっており、沿岸海域土地利用図が示すように現在も鈴鹿沖には礫、砂粒子を含む粗粒堆積物が分布していると考えられる。

上記したように、本研究の採取地点数は沿岸海域土地条件図に比べると少なく、正確に粒度変化が生じた

海域を把握することは難しいため、現在の表層堆積物のデータを追加して比較する必要がある。また、粒度変化した時期を明らかにするためには柱状堆積物試料を用いた時系列変化を把握する必要がある。さらに、細粒化と水利営力との関係を明らかにするには、堆積物の情報に加えて、数値モデルを用いた地形改変に伴う潮流速の変化などと合わせて議論する必要がある。今後、これらについて検討し、人為的な改変と伊勢湾の海底環境との関係が解明されることが期待される。

6. まとめ

伊勢湾、三河湾の表層堆積物を用いて、粒度、TOC・TN・TS濃度、 $\delta^{13}\text{Corg}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、鉱物組成の分布を明らかにし、その結果を基に現在の海底環境について議論した。伊勢湾、三河湾の粒度分布は、湾奥、湾央部では潮汐流は遅く、停滞的な水理環境であるため泥質堆積物が分布し、湾口部では潮汐流が著しく速くなり、粗粒化し粗粒シルト～細粒砂が分布することを示す。TOC、TN、TS濃度は湾奥、湾央部で高いことを示し、有機物負荷量が多く、酸素の少ない還元的な海底環境であることを示す。堆積物中の有機物起源の指標となるC/N比、 $\delta^{13}\text{Corg}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は湾奥部では海洋プランクトン起源の有機物が大部分を占めるが、河口沖合や湾口部では陸上植物起源の有機物の寄与が増加することを示す。鉱物組成の変化は粒度との関係が強いが、松坂－伊勢沖合では白雲母の割合が高くなり、伊勢湾南西部からの流入河川の供給作用の影響を受けていることを示す。また、土地利用沿岸海域図を基に作成した粒度分布と比較した結果は、1970～1980年代から2000年代にかけて鈴鹿市沖海域と知多半島南部西方海域で底質が細粒化したことを示す。

謝辞：地圏資源環境研究部門の鈴木正哉氏、森本和也氏には鉱物分析について、東京大学の山室真澄教授には有機炭素・窒素安定同位体比測定についてご教授頂きました。各位に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 天野敦子・金 廣哲・小野寺真一・佐藤高晴・清水裕太・斎藤光代（2013）岡山県児島湾における堆積物を用いた過去100年間の海底環境変遷と人造湖形成の影響評価。陸水学雑誌、73, 217–234.
天野敦子・清家弘治・大上隆史・田村 亨（2019）伊勢湾・三河湾の海洋堆積物採取調査の概要。平成30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.79,

- 1–11.
- Berner, R. A. (1983) Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**, 606–615.
- Bianchi, T.S. (2007) *Biogeochemistry of Estuaries*. Oxford University Press. New York, 687.
- Bordovskiy, O. K. (1965a) Source of organic matter in marine basins. *Marine Geology*, **3**, 5–31.
- Bordovskiy, O. K. (1965b) Accumulation of organic matter in bottom sediments, *Marine Geology*, **3**, 33–82.
- Curran, C.A., Newell, S.Y., and Paerl, H.W. (1995) The role of standing dead *Spartina alterniflora* and benthic microalgae in salt marsh food webs: Considerations based on multiple stable isotope analysis. *Marine Ecology Progress Series*, **121**, 99–116.
- Deegan L.A. and Garrett R.H. (1997) Evidence for spatial variability in estuarine food webs. *Marine Ecology Progress Series*, **147**, 31–47.
- Fry, B., and Sherr, E. B. (1984) $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contrib. Mar. Sci.*, **27**, 13–14.
- Folk, R. L. and Ward, W. C. (1957) Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**, p. 3–26.
- 林 英文・今里哲久・辻本哲郎 (2007) 伊勢湾・三河湾の海水交換に関する数値実験. 沿岸海洋研究, **44**, 177–190.
- 国土交通省中部地方整備局 (2008) 伊勢湾環境データベース, <https://www.isewan-db.go.jp/IsewanKankyo/ik02.asp> (閲覧日: 2023年8月14日).
- 藤原建紀 (2002) 伊勢湾の生態系を支配する流動構造. 日本プランクトン学会報, **49**, 114–121.
- 海上保安庁 (2004) 伊勢湾潮流図. 海上保安庁.
- 岸本清行 (2000) 海陸を合わせた日本周辺のメッシュ地形データの作成: Japan250m.grd. 地質調査所研究資料集, 353 (CD).
- 国土地理院 (1973) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「四日市」.
- 国土地理院 (1973) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「津東部」.
- 国土地理院 (1973) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「豊橋」.
- 国土地理院 (1974) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「伊良湖」.
- 国土地理院 (1974) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「蒲郡」.
- 国土地理院 (1974) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「鳥羽」.
- 国土地理院 (1976) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「半田」.
- 国土地理院 (1978) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「師崎」.
- 国土地理院 (1978) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「答志」.
- 国土地理院 (1984) 25000 分の 1 沿岸海域土地条件図「松阪」.
- 黒田伸郎・藤田弘一 (2006) 伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較, 愛知県水産試験場研究報告, **12**, 5–12.
- 桑原 徹 (1968) 濃尾盆地と傾動地塊構造. 第四紀研究, **7**, 235–247.
- Lu, X. and Matsumoto, E. (2005) Recent sedimentation rates derived from ^{210}Pb and ^{137}Cs methods in Ise Bay, Japan. Estuarine, Coastal and Shelf Science, **65**, 83–93.
- 牧本 博・山田直利・水野清秀・高田 亮・駒澤正夫・須藤定久 (2004) 20万分の1地質図幅「豊橋及び伊良湖岬」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Mayer, L. M. (1994a) Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 1271–1284.
- Mayer L. M. (1994b) Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments. *Contributions in Marine Science*, **114**, 347–363.
- 森山昭雄 (1976) 沖積平野及び浅海底の地形と粒度組成 その2- 三河湾北西部浅海デルタの底質の粒度分析結果-. 愛知教育大学地理学報告, **45**, 99–106.
- 水野清秀・小松原琢・脇田浩二・竹内圭史・西岡芳晴・渡辺 寧・駒津正夫 (2009) 20万分の1地質図幅「名古屋(第3版)」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 中村元彦・黒田伸郎 (2005) 伊勢・三河湾における漁業の推移. 総合郷土研究所紀要, **50**, 239–252.
- 西岡芳晴・中江 訓・竹内圭史・坂野靖行・水野清秀・尾崎正紀・中島 礼・実松健造・名和一成・駒津正夫 (2010) 20万分の1地質図幅「伊勢」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター
- 西村富子 (1976) 伊勢湾南部と三河湾の海底堆積物の化学成分 – 主として微簸元素の分布 -. 地質調査所月報, **27**, 789–805.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J.,

- Hoffmann, D.L., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M. and van der Plicht, J. (2013) IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, **55**, 1869–1887.
- 斎藤文紀・茅根 創 (1991) :富津州及び周辺海域の地形・堆積物とその変化. 堆積学研究会報, **34**. 135–138.
- 佐藤智之 (2025) 伊勢湾・三河湾沿岸域 10 万分の 1 海底地質図説明書. 海陸シームレス地質情報集「伊勢湾・三河湾沿岸域」, 海陸シームレス地質図 S-8, 産総研地質調査総合センター.
- 佐藤 敏 (1996) 伊勢湾表層の循環流について. 沿岸海洋研究, **33**, 221–228.
- 清家弘治・天野敦子 (2020) 伊勢湾・三河湾の表層コア試料に見られる堆積構造. 令和元年度沿岸域の地質・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.81, 35–40.
- Stuiver, M. and Reimer, P.J. (1993) Extended 14C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, **35**, 215–230.
- 陶 正史・柴山信行・峯 正之・岩本孝二・当重 弘・稻積 忍 (1982) 伊勢湾海底堆積物の重金属汚染. 水路部研究報告, **17**, 379–393.
- 鈴木輝明 (1998) 貧酸素化. 「沿岸の環境圏」平野敏行監修, フジテクノシステム, 東京, **475–479**.
- 高橋鉄哉・藤原建紀・久野正博・杉山洋一 (2000) 伊勢湾における外洋系水の進入深度と貧酸素水塊の季節変動. 海の研究, **9**, 265–271.
- 田中陽二・鈴木高二朗・内田吉文・白崎正浩 (2010) 伊勢湾・三河湾における海洋短波レーダーを用いた表層平均流に関する研究. 土木学会論文集 B2(海岸工学), **66**, 1431–1435.
- 宇野木早苗 (1983) 三河湾の恒流とその要因. 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 510-514.
- 宇野木早苗・小西達男 (1998) 埋め立てに伴う潮汐・潮流の減少とそれが物質分布に及ぼす影響. 海の研究, **7**, 1–10.
- Volkman JK, Rohjans D, Rullkötter J, Scholz-Bottcher BM and Liebezeit G (2000) Source and diagenesis of organic matter in tidal flat sediments from the German Wadden Sea. *Continental Shelf Research*, **20**, 1139–1158.

(受付: 2023 年 10 月 5 日; 受理: 2025 年 1 月 27 日)