有機炭素分析による沿岸域に記録された洪水堆積物の特徴 —2003年台風10号, 北海道日高沖陸棚の例—

Characteristics of shallow marine flood sediments by organic carbon analyses, examples from shelf sediments off Hidaka, southern Hokkaido, after the 2003 typhoon no.10

Abstract

大村亜希子¹ 池原 研² 片山 肇²
入野智久³ 嵯峨山 積^{4,†}

Akiko Omura¹, Ken Ikehara²,
Hajime Katayama², Tomohisa Irino³ and
Tsumoru Sagayama^{4,†}

2016年3月16日受付.

2017年1月11日受理.

¹ 日本学術振興会特別研究員(RPD), 東京大学
大学院新領域創成科学研究科
JSPS Research Fellow, Graduate School of
Frontier Science, The University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-
8564, Japan.

² 産業技術総合研究所地質情報研究部門
Research Institute of Geology and Geoinfor-
mation, Geological Survey of Japan, AIST,
1-1-1 Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan

³ 北海道大学大学院地球環境科学研究院
Faculty of Environmental Earth Science,
Hokkaido University, Kitaku, Sapporo 060-
0810, Japan

⁴ 北海道立総合研究機構地質研究所
Geological Survey of Hokkaido HRO, Sap-
poro 060-0819, Japan

† 現所属: NPO 北海道総合地質学研究センター
Present address: NPO Hokkaido Research
Center of Geology, 2-3-5-24 Yamanote, Ni-
shi-ku, Sapporo 063-0002, Japan

Corresponding author: A. Omura,
a-omura@aori.u-tokyo.ac.jp

We conducted an organic carbon analysis of flood sediments from the 2003 typhoon no. 10 off Hidaka, southern Hokkaido. Flood-induced sediments from the river mouth, inner shelf, outer shelf, and upper slope are rich in terrigenous organic carbon. Four years after the typhoon, flood sediments were found preserved in a topographic depression on the inner shelf, within an area protected from waves and currents. Stratigraphic variations in terrigenous organic carbon ratios in flood sediments from the depression reflect changes in river discharge with rainfall during the flood. Our results indicate that terrigenous material from the river mouth was continuously supplied and deposited on the shelf. These stratigraphic variations in the terrigenous organic carbon ratio could be significant in ongoing attempts to discriminate flood sediments from ancient turbidite successions.

Keywords: flood sediments, organic carbon analysis, terrigenous organic carbon ratio, shelf, Hokkaido

はじめに

1. 海域での堆積層形成への洪水の影響

地形の起伏が大きく多雨地域を流れる河川が多い南アジア～オセアニアは、堆積物の生産と海域への供給が盛んであり、世界全体の堆積物運搬量の約70%を占めることで知られる(Milliman, 1991). 山岳地から沿岸までの距離が短く急流河川が多い日本においても、ダムの堆砂量から推定したダムへの単位面積あたりの年間の平均堆積物運搬量は平均700 t/km²と見積もられ(齋藤・池原, 1992), これは世界の河川の堆積物生産量を6段階に区分した場合(Milliman, 1991)に2番目に多い階級に入る(齋藤・池原, 1992). 海域

へ供給された堆積物は、一般的に沿岸域や陸棚域に堆積すると考えられているが、堆積しやすい場所がある一方で再移動により実際には堆積していない場所がある。陸棚の幅が狭い海域では河川から供給された碎屑物の多くが海底谷などを通じてより深い海底へ堆積することもあり、海域での堆積様式は一概ではない。

日本の河川での出水のピークは、主に融雪期、梅雨期、台風期のいずれかであることが一般的であり、本研究で対象とした北海道の河川では、融雪期のピークが主であると言われている(阪口ほか, 1986). 実際、日高地方の代表的な一級河川である沙流川(さるがわ)の2003年における流量統計(Fig. 1)を見ると、融雪期(4～6月)には平水時の数倍～最大10倍程度の流量

Fig. 1. Seasonal variability in daily water discharge in 2003 at Horokeshi Bridge ($42^{\circ}42'41''\text{N}$, $142^{\circ}14'46''\text{E}$) in the Saru River watershed. Inset shows water discharge from 8 to 11 August, including the flood related to typhoon no. 10.

が約2ヶ月にわたって続き、さらに、台風期(8~10月)には降水イベントにともなう平時の10~100倍に及ぶ短期間の出水が何回か起こる、という季節変動パターンが特徴的である[URL1]。特に、本論文で問題とする2003年8月9日の台風10号にともなう出水では、8月10日午前2時における幌毛志橋における流量が $3934.77 \text{ m}^3/\text{s}$ に及んだことが記録されている。一般に河川懸濁物運搬量(浮流土砂量)は河川水流量の2乗程度に比例する(高山, 1974)。台風による河川水流量の増加は河川懸濁物の運搬量を増加させるため、台風に伴う洪水は海域への堆積物運搬の主要因となり得る。すなわち台風による洪水時の影響が海域での堆積層形成の理解に重要であることを示唆する。

2. 海域に形成された洪水堆積物

海域や湖沼の堆積物から、洪水時に発生するハイパーピクナル流(hyperpycnal flow)により堆積した堆積物(ハイパーピクナイト, hyperpycnite; Mulder et al., 2002)が報告されるようになったのは、1990年代中頃からである。ハイパーピクナル流は、粒子支持メカニズムが乱流である混濁流(turbidity current)の一種に分類され、その中で持続時間が非常に長い準定常混濁流の典型である(Mulder and Alexander, 2001)。ハイパーピクナル流からの堆積物は、長時間継続する洪水流の増大や減衰、これらの繰り返しを反映した堆積構造を持つ(Mulder et al., 2003)。このため、主として海底の崩壊によって発生する乱流サージからの堆積物として良く知られる「Bouma シーケンス」(Bouma, 1962)、「Lowe シーケンス」(Lowe, 1982)といった、一過性で単調減衰する流れを反映した一連の正級化とは異なる堆積構造を示す。ハイパーピクナイトの認定基準としては、逆級化する下部ユニットと正級化する上部ユニットをもつ、内部侵食面を含む、細粒部と粗粒部・トラクション構造と塊状部の繰り返しが見られる、層が沖側で急に薄化する、陸源の植物片を含むという特徴が挙げられ(Mulder et al., 2001; Plink-

Björklund and Steel, 2004; 齋藤ほか, 2005)、これらの全てあるいは複数の特徴が認められる場合、その堆積物はハイパーピクナイトである可能性が高い(齋藤ほか, 2005)。齋藤ほか(2005)は Mulder and Syvitski(1995)によるハイパーピクナル流の発生頻度を再検討し、この論文に示された世界各地の147河川のうち61の河川において毎年ハイパーピクナル流が発生しているとした(齋藤ほか, 2005)。このことは、地質学的時間スケールで見ると、ハイパーピクナル流の発生は非常に頻度の高いイベントであり(齋藤ほか, 2005)、地層として残される可能性も高いことを示唆する。しかしながら、ハイパーピクナイトは前述のように砂層に見られる級化構造、平行葉理、カレントリップル葉理、クライミングリップル葉理などの堆積構造と内部侵食面などが繰り返す累重様式によって認定されるため、砂質部が薄いあるいは砂質部をほとんど伴わない堆積物では認定が難しい場合があることが予想される。

3. 洪水堆積物研究への有機炭素分析の利用

沿岸域と周辺の深海域には陸起源と海洋起源の粒子が混在し、有機炭素にも両方の起源のものが含まれることは、海水中の懸濁粒子や海底表層堆積物中の有機炭素の安定同位体比や有機炭素/全窒素(C/N)比などの化学分析から明らかである(例えば, Tyson, 1995; Naidu et al., 2000; Goni et al., 2003; Usui et al., 2006)。本研究の対象海域に近い北海道十勝地方沖合の沿岸~陸棚の海底表層堆積物では、有機炭素に占める陸上植物起源の割合を示す安定炭素同位体比の値と堆積物の粒径に正の相関が認められ、全有機炭素量と安定炭素同位体比の値には負の相関が認められている(Nagao et al., 2005)。Nagao et al.(2005)は、これらの結果から、堆積物に含まれる有機炭素はその起源とともに海底堆積物の再懸濁を含む堆積プロセスの影響を受けて変化すると指摘した。このことは、有機炭素分析が堆積プロセスの研究に有用であることを示唆する。

Fig. 2. Regional and local bathymetric maps off Hidaka, southern Hokkaido, showing sampling locations of sediments used in this study. Also shown is the distribution of surface sediments classified by median diameter (Katayama et al., 2007). Sample names in bold indicate columnar sediment samples obtained with an Ashura corer, while others are surface sediments obtained with a grab sampler.

有機炭素は一般的に砂質堆積物よりも泥質堆積物に多く含まれる。そこで本研究では、含まれる有機炭素量とともに有機炭素に占める陸上植物起源の割合に注目して、2003年8月の台風10号による洪水時に河口周辺～陸棚斜面の海底に形成された堆積物の特徴を示すことを目的とした。海底表層の洪水堆積物の特徴と、柱状に採取された堆積物については層序的变化の特徴を示すこととした。泥質部主体の洪水堆積物の層序的特徴は、砂質部が薄いあるいは砂質部を伴わない過去の洪水堆積物を認定する際に利用できると期待される。

海底地形と洪水堆積物の分布

1. 2003年台風10号による豪雨と海域への土砂流出

2003年8月、大型で強い勢力を保ち北海道南部～東部に接近した台風10号とこの台風に刺激された停滞前線は、日高および十勝地方に記録的な豪雨をもたらした。降雨のピークは8月9日未明から翌10日までのほぼ24時間にあり、アメダス旭地点で最大日雨量358 mm、最大時間雨量76 mmを記録する既往最大規模の豪雨であった(長谷川,

2004)。この豪雨により、日高支庁旭地点周辺の額平川とその下流の沙流川および厚別川流域では、斜面崩壊とこれに伴う土砂生産、洪水が発生した。沙流川上流に位置する二風谷ダムではダム放流地点での流出土砂量が106万 m^3 、平常年の堆砂量の2年分に相当する74万 m^3 がダムに堆積し、河口に近い沙流川橋での流出総量は101万 m^3 と見積もられた(長谷川, 2004)。沙流川および鶴川の河口域における土砂堆積調査の結果、沿岸域に堆積した土砂量はそれぞれ209万 m^3 、72万 m^3 であった(長谷川, 2004)。日高管内の漁業協同組合への聞き取り調査では、この洪水の後、沖合に泥の帯状の分布ができ、水深数100 mにおいても漁具が牧草を含む泥に埋没する被害があった(池原ほか, 2006a)。

2. 研究海域の地形と堆積物の分布

研究海域に面する沿岸には、西から東へ、いずれも日高山脈に源流をもつ鶴川、沙流川、厚別川、新冠川、静内川などが流入する(Fig. 2)。陸棚の幅は沙流川沖で約20 kmであり、東に向かって狭くなり静内川沖では約12 kmとなる。陸棚外縁の水深は約120 mであり、沖合の陸棚斜面に続き

水深 500 m 以深には日高トラフが発達する (Fig. 2; 野田・片山, 2013; 辻野・井上, 2012). 日高トラフの北縁に位置する陸棚は前縁盆地の褶曲帯であり, 調査海域の陸棚～陸棚斜面には, 北北西-南南東～北西-南東の背斜軸をもつ鵝川沖背斜, 門別沖背斜, 静内沖背斜が分布し (辻野・井上, 2012), 鵝川沖背斜には逆断層である鵝川沖断層が随伴する (佐藤ほか, 2013). 沙流川から厚別川沖には水深 40～50 m の沖合まで新第三紀の堆積岩からなる基盤岩が岩礁を形成している (菅ほか, 1997; 海上保安庁水路部, 1982). 沙流川沖では河口沖から水深 40 m 付近まで幅 2～2.5 km, 比高数 m の浅い凹地状の地形が発達する. これは最終氷期に形成された谷が埋積されずに残されたものであり (菅ほか, 1997), 凹地を埋積している堆積層は約 15～25 m の厚さである (海上保安庁水路部, 1982). 厚別川沖にも同様の凹地があるが, 新冠川と静内川の沖合では現在の海底地形に凹地は認められない.

2003 年の洪水以前の 1993 年に北海道立地下資源調査所 (当時) により行なわれた門別～静内沿岸海域調査 (菅ほか, 1997), および洪水後の 2005～2006 年に産業技術総合研究所により実施された沙流川河口沖～静内川河口沖の陸棚調査 (片山ほか, 2007a; 野田・片山, 2013) によれば, 沙流川, 厚別川および静内川河口～水深約 60 m までの内側・中部陸棚の海底には主に極細粒～粗粒砂が分布し (Fig. 2), 砂粒組成から日高山系起源の碎屑物が周辺河川から供給されたものと考えられている (菅ほか, 1997). 沙流川と静内川の河口近くには泥が分布し, 沙流川と厚別川の河口の間の水深 10～20 m には礫が分布する (Fig. 2; 野田・片山, 2013). 沙流川～厚別川沖の内側陸棚では海底表層部に分布する新第三系の基盤岩を淘汰の悪い極細粒砂～礫が薄く覆っている (Fig. 2; 片山ほか, 2007a; 野田・片山, 2013). 沙流川沖の凹地内には周囲よりも細粒な中粒砂が分布し, 2003 年の洪水後の調査ではいくつかの地点で泥も認められた (片山ほか, 2007a). 水深約 60 m 以深の外側陸棚には主に泥が混合した淘汰の悪い細粒～極細粒砂が分布し, 一部に泥の分布も認められる (Fig. 2; 片山ほか, 2007a; 野田・片山, 2013). 外側陸棚には地形的な凹地は認められないが, 内側陸棚の凹地の延長に位置する海域では周囲よりも細粒で含泥率が高い堆積物が分布する (Fig. 2; 片山ほか, 2007a).

2003 年 8 月に発生した洪水の直後に, 北海道開発局によって鵝川と沙流川河口沿岸域の細粒堆積物の調査が行なわれた (山下, 2004). 洪水の約 10 日後の調査では, 沙流川では河口から 10 km 以上, 水深 30 m 以上の広い海域に灰黄色のシルト質堆積物が堆積し, 堆積層厚は河口沿岸域で 10～27 cm 程度であった (山下, 2004). 鵝川では河口から約 3 km の水深 13 m 以浅の海域に灰黄色の細粒堆積物が 10～20 cm 程度の厚さで確認された (山下, 2004). 洪水の約 25 日後と約 40 日後に行なわれた調査では, 波や流れによる再移動のため堆積層厚の減少が認められた (山下, 2004).

洪水から約 2 年後に行なわれた調査では, 北海道開発局が洪水直後に行った調査で確認された洪水性の細粒堆積物のほとんどは流出し, 最終氷期に形成された谷地形の埋め残し

とされる凹地内にはのみ認められた (池原ほか, 2006a; 片山ほか, 2007a). 凹地の中ではその外側の平坦面よりも波浪や流れの影響が少ないことから, 細粒堆積物がトラップされやすく, 洪水堆積物が保存されたと考えられている (池原ほか, 2006a; 片山ほか, 2007a). 凹地内に保存された 2003 年の洪水堆積物にはハイパーピクナル流の影響を受けたものも認められている (Katayama et al., 2006; Ikehara et al., 2007). また, 洪水時にはこの凹地に沿ってさらに沖合の陸棚斜面まで細粒堆積物が輸送されたと考えられている (池原ほか, 2006a).

試料・分析方法

1. 海底表層堆積物試料

有機炭素分析には, 洪水起源の海底表層堆積物, 洪水の影響のない通常時の海底表層堆積物, 洪水堆積物の層序的变化を検討するための柱状試料 (以下, コア試料) を用いた. 2003 年の洪水による堆積物を含む海底表層試料は, 洪水直後, 2 年後, 3 年後にそれぞれ以下の地点から採取された.

洪水直後の試料は, 洪水の 17 日後および 24 日後に北海道立地質研究所 (当時) によって沙流川および新冠川の河口周辺, 沙流川沖の陸棚斜面上部から採取された海底表層堆積物 6 試料である (Table 1, Fig. 2). 北海道立地質研究所による粒度分析の結果, 沙流川河口近くから採取された試料 0-2, 試料 0-3, 試料 0-4, 試料 0-5, および陸棚斜面上部から採取された試料 (試料 0-1) は, いずれも泥分含有率が高く, 植物片を多く含み, 植物片には笹の葉や草本類など緑色を残しているものもあること (Table 1, Fig. 2) から, これらの堆積物は採取直前の河川からの流出物と考えられる. 1993 年に北海道立地質研究所が実施した底質調査では沙流川の沖合で泥質堆積物が採取され, これらは近年の集中豪雨時に沙流川から流出し堆積したものと考えられている (菅ほか, 1997). これらの結果は, 沙流川河口から沖合 2～3 km (水深約 20 m) 付近までは, 平穏時には河川の延長方向に細粒～中粒砂が堆積する場所である (Fig. 2) が, 豪雨時には河川から流出した泥が堆積する場所となることを示す. また, 新冠川河口から採取された試料 0-6 (Table 1, Fig. 2) も泥分含有率が高く, 沙流川沖と同様に採取直前の河川からの流出物と考えられる.

洪水の 2 年後および 3 年後の海底表層堆積物として, 産業技術総合研究所と北海道立地質研究所 (当時) により沙流川河口～沖合の陸棚, 静内川沖, 厚別川沖, 沙流川沖の陸棚斜面上部からスミス・マッキンタイヤー式グラブ採泥器を使用して採取された 15 試料 (Table 1, Fig. 2), 沙流川沖の凹地内からダイバーによって採取された試料 (試料 3-7, 試料 3-8; Table 1, Fig. 2), および産業技術総合研究所による GH06 航海の際にアシュラ採泥器によって採取された試料 (試料 3-9; Table 1, Fig. 2) を使用した. 陸棚斜面上部の試料採取地点 (試料 3-9; Table 1, Fig. 2) は洪水の直後に漁具が泥に埋まっていたことが確認された地点 (試料 0-1; Table 1, Fig. 2) である (池原ほか, 2006a; 片山ほか, 2007a). これらの試料の詳細は片山ほか (2007a, b) に報告されており,

Table 1. Description of sediment samples for organic carbon analyses. Gray shading indicates flood sediments.

Sampling periods	Sampling date	Site (depositional environments)	Sample name in this paper	Original sample name	Description	Sampler	References
17 or 24 days after the flood	27 August 2003	Upper slope	0-1	I	sandy mud, plant fragment bearing, mud content 44.9%		
			0-2	II-1	mud, plant fragment bearing, mud content 90.1%		
	3 September 2003	Shelf off Saru River	0-3	II-2	muddy sand, plant fragment bearing, mud content 73.9%		
			0-4	II-3	muddy sand, plant fragment bearing, mud content 64.0%		
			0-5	II-4	muddy sand, plant fragment bearing, mud content 59.2%		
1 year after the flood (reference site)	7 August 2004	River mouth of Niihappu River	0-6	II-5	muddy sand, plant fragment bearing, mud content 71.8%		
			1-1	GH04-308	olive black clayey silt (0-2cm), dark olive gray clayey silt, semi-hardened (2-15cm)	K-grab	Noda and Katayama (2005)
	5 August 2004	Slope off Cape Erimo	1-2		olive black sandy silt (21cm)	K-grab	Noda and Katayama (2005)
			2-1	7	grayish olive clay (surface only), olive black coarse silt, well sorted (4cm)	Smith-McIntyre Grab	Katayama et al. (2007a)
			2-2	14	dark olive clay?		
2 years after the flood	28 September - 5 October 2005	Shelf off Saru River	2-3	5	grayish olive to olive black muddy coarse sand, pumice rich (5cm)	Smith-McIntyre Grab	Katayama et al. (2007a)
			2-4	6	olive black muddy fine sand, pumice bearing (5cm)		
			2-5	9	dark olive silt (0-0.3cm), olive black very fine sand (0.3-2cm), grayish olive silt (2-4.5cm)		
			2-6	10	dark olive clay (0-4cm), dark olive gray clay (4-5cm), olive black clay (5-7.5cm)		
			2-7	13	olive black muddy fine sand, pumice rich (4.5cm)		
			2-8	17	grayish olive muddy fine sand, pumice rich (0-0.5cm), black muddy fine sand (0.5-4.5cm)		
			2-9	19	olive black sandy silt, pumice rich (0-0.5cm), olive black silt (0.5-3cm), black sandy silt with pumice rich part (3-6cm)		
			3-1	54	olive black silt (0-3.5cm), dark olive gray silt (3.5-7cm)	Smith-McIntyre Grab	Katayama et al. (2007a)
			3-2	55	olive black sandy silt (0-5cm)	Smith-McIntyre Grab	Katayama et al. (2007a)
			3-3	56	olive black muddy very fine sand, pumice bearing (0-6.5cm)		
3 years after the flood	5 July 2006	Shelf off Shizunai River	3-4	57	olive black very fine sand, shell fragment bearing (0-3cm)		
			3-5	60	olive black fine sand, pumice bearing (0-4cm)		
			3-6	73	grayish olive silt (0-1cm), olive black sandy silt (1-1.5cm), olive black silt (1.5-2.5cm), black silt (2.5-6cm)	Smith-McIntyre Grab	Katayama et al. (2007a)
			3-7	D-1	olive brown clay (0-6cm), black medium to coarse sand with granule and pebble (6-23.5cm)	Diver	Katayama et al. (2007b)
			3-8	D-2	olive black silt (0-0.3cm), olive black muddy fine sand (0.3-13cm), olive black medium sand (13-16cm), olive black fine sand (16-22cm), olive black medium sand (22-27.5cm)		
			3-9	GH06-1050A	olive gray silty clay (0-1.5cm), clayey silt (1.5-23.5cm)		
			4-1	95A	grayish olive silt (0-1cm), grayish olive silty clay (1-15cm), black silty clay (15-16.5cm), black muddy medium sand (16.5-17cm)	Ashura	Noda et al. (2007), Katayama et al. (2007b)
			4-2	104A	olive black silty clay (0-6cm), grayish olive silty clay (6-15cm), olive black sandy silt (15-18cm), olive black muddy medium sand (18-19cm), olive black silty clay (19-22cm), olive black silty clay, plant debris rich (22-23cm)		
4 years after the flood	8 August 2007	Shelf off Saru River (depression)					

Table 2. Description of river water samples for organic carbon analyses. DO: dissolved oxygen, COND: conductivity, TURB: turbidity, TEMP: temperature, CHL: chlorophyll, and FWV: filtered water volume.

Sampling date & time	River	Location	pH	DO(mg/L)	COND(mS/m)	TURB(NTU)	TEMP(°C)	CHL(ug/L)	FWV(cc)	$\delta^{13}\text{C}$ value (‰)
5 July 2006 15:30	Shizunai River	Shibechari Bridge	7.79	9.22	5.5	11.6	14.6	5.0	900	-28.76
6 July 2006 13:45	Niikappu River	Niikappu Bridge	7.70	8.37	7.0	29.3	14.3	3.4	600	-27.93
7 July 2006 15:40	Atsubetsu River	Appetsu Bridge	7.55	8.78	11.8	35.0	19.4	6.1	350	-28.21
9 July 2006 14:10	Saru River	Sarugawa Bridge	7.97	7.92	12.4	18.3	18.6	3.1	484	-28.15
9 July 2006 12:00	Nukabira River	Nukibetsu Bridge	7.95	7.56	12.7	34.4	19.2	6.2	500	-26.86
9 July 2006 11:30	Saru River	Horokeshi Bridge	7.96	7.64	9.3	1.6	18.3	0	2152	-25.95

沙流川沖では凹地内に分布する泥は 2003 年の洪水起源の可能性が高いが、洪水直後に内側陸棚に分布していた洪水起源の泥のほとんどは波浪や流れの影響により流出したと考えられている(片山ほか, 2007a)。

洪水堆積物と比較するため、洪水の影響のない陸棚斜面の堆積物は、産業技術総合研究所により 2004 年に実施された GH04 航海において、襟裳岬沖の水深 519 m と 1131 m から木下式グラブ採泥器を用いて採取された 2 試料(試料 1-1, 試料 1-2)とした。これらの海底表層堆積物は、オリーブ黒色の砂質シルトおよび粘土質シルトであり(野田・片山, 2005)、半遠洋性泥とみられる。

2. 柱状堆積物試料(コア試料)

洪水の 4 年後の柱状堆積物として、沙流川沖の凹地内からアシュア採泥器によって採取されたコア試料 4-1 およびコア試料 4-2 (Table 1, Fig. 2)を用いた (Table 1, Fig. 2)。これらのコア試料は洪水による堆積物の層序的变化を解析するために用いた。コア試料の堆積年代はテレダインアイソトープ社へ堆積物の ^{137}Cs 分析を依頼し、その検出結果にもとづいて検討した。それぞれ 4 層準から 2.5 cm あるいは 3 cm の厚さで採取された堆積物の ^{137}Cs を測定した。

3. 河川懸濁物試料

海底堆積物に含まれる陸上植物起源の有機炭素の割合を見積もるためには、陸上植物と海洋プランクトンそれぞれの起源の安定炭素同位体比の値が必要である。本研究では、海底表層堆積物を採取した海域へ流入する陸上植物起源の安定炭素同位体比の値を決定するために、沙流川、額平川、新冠川、厚別川、および静内川において採取された河川水を濾過した試料を分析に用いた (Table 2)。沙流川、新冠川、厚別川、静内川はいずれも日高沖沿岸に流入する河川であり、額平川は沙流川上流の支流である (Fig. 2)。河川水が採取された 2006 年 7 月 5 日～9 日には、7 日の夜～8 日の朝にかけて 1～2 mm/時間程度の弱い雨が観測されたほかに降雨はなかったため、平常時の河川水を採取したことになる。沙流川と同様に十勝川も 4～5 月と 9 月に河川流量が比較的多い。十勝川では河川流量の増加する時期に懸濁物濃度も増加する傾向があるが、懸濁物濃度と安定炭素同位体比の値には相関がないことが報告されている (Usui et al., 2006)。後述するように、沙流川においても懸濁物濃度(濁度)と安定炭素同位

体比の値には相関が認められない (Table 2)。この結果から、平常時の河川水に含まれる有機炭素の安定同位体比分析値を用いて、洪水による堆積物に含まれる陸上植物起源の有機炭素の割合を見積もることに問題はないと考えられる。有機炭素分析には、採取した河川水を懸濁物濃度に応じて 350～2152 cc を、事前に 450°C で 5 時間灼熱処理したガラス繊維ろ紙 (Whatman, GF/F) に濾過、回収した懸濁物試料を用いた (Table 2)。

4. 全有機炭素量・安定炭素同位体比測定と陸源有機炭素率の見積もり

全有機炭素量 (TOC) および有機炭素の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) を測定した堆積物は乾燥・粉碎後、塩酸を使用して炭酸塩を除去した。ガラス繊維ろ紙を用いて濾過した河川懸濁物試料は、ろ紙と濃塩酸を入れたガラスビーカーとともに密封容器に入れ、塩化水素蒸気に曝し炭酸塩を除去した。測定には東京大学大気海洋研究所に設置されている元素分析計 (FlashEA1112, Thermo Fisher Scientific Inc.) および質量分析計 (Delta Plus XP, Thermo Fisher Scientific Inc.) を使用した。塩酸処理後の堆積物粉末を数 10 mg スズ箔に包み、元素分析計により温度 1000°C で燃焼させ、精製された二酸化炭素ガスをヘリウムをキャリアガスとして質量分析計に導入し、同位体比を測定した。河川懸濁物試料はガラス繊維ろ紙とともにスズ箔に包み、堆積物と同様の条件で測定した。同位体比の値 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) を装置付属のソフトウェアにより国際標準物質に対する千分率 (V-PDB‰) として算出した。作業用の標準物質として Glycine ($\delta^{13}\text{C}$ 値 = -28.70‰, -33.8‰) を使用し、堆積物試料を 5～8 個測定する毎に標準物質の測定を行った。標準物質の繰り返し測定による測定値のばらつきは $\pm 0.2\%$ 以下 (n=148) であった。同一試料について 2 回ずつ測定し、2 回の平均値を結果として示した。

低～中緯度地域では、陸上植物を起源とする有機炭素は C4 植物を除いて海洋起源の有機炭素と異なる値を持ち、陸上植物起源の炭素同位体比の値として -25～-28‰、海洋起源の値として -19～-23‰ (Deines, 1980; Rau et al., 1982; Jasper and Gagosian, 1990) が知られている。この論文では、陸源の有機炭素の安定同位体比の値として、後述する河川懸濁物試料の測定結果の平均値 (-27.6‰) を、海

Fig. 4. Lithology, soft-X radiograph, ^{137}Cs occurrence, grain-size distributions, TOC contents, $\delta^{13}\text{C}$ values, and terrigenous organic carbon ratio of the 4-2 core. Md: median grain size.

のである。

有機炭素分析結果

1. 河川懸濁物の $\delta^{13}\text{C}$ 値

ガラス繊維ろ紙を用いて濾過した河川水の懸濁物の安定炭素同位体比の値を Table 2 に示す。安定炭素同位体比の値 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) は $-25.95 \sim -28.76\%$ であり、採取河川によって最大約 3% の違いが認められた。河川水の採取時に測定された、pH、溶存酸素濃度、電気伝導度、濁度、水温、クロロフィル濃度、ガラス繊維ろ紙による濾過量と $\delta^{13}\text{C}$ 値の間にはとくに相関は認められない (Table 2)。海底堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ 値から陸源の割合を見積もる際には、これら河川懸濁物 6 試料の測定値の平均である -27.6% を使用した。

2. 海底表層堆積物の TOC 量・ $\delta^{13}\text{C}$ 値

海底表層堆積物の全有機炭素 (TOC) 量と $\delta^{13}\text{C}$ 値は、それぞれ $0.27 \sim 4.79\%$ 、 $-21.58 \sim -27.12\%$ であり、サンプルの採取時期と採取地点の地形を反映して大きな違いがある (Fig. 5)。洪水の 17~24 日後に採取された沙流川河口沖内側陸棚および新冠川河口周辺の堆積物 (試料 0-2~試料 0-6; Fig. 5) では、TOC 量が $0.87 \sim 4.79\%$ と高く、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が $-23.91 \sim -27.12\%$ と小さい。陸棚斜面上部において洪水直後に漁具が泥に埋まった被害が確認された地点 (試料 0-1; Fig. 5) では、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は比較的小さく -23.91% 、TOC 量は 4.61% であり非常に高い (Fig. 5)。洪水の 2~4 年後に採取された試料では、沙流川沖内側陸棚の凹地内とその延長と見られる外側陸棚および厚別川沖の凹地内と、沙流川・新冠川河口周辺において採取された堆積物では、TOC 量が高く ($0.77 \sim 2.90\%$; Fig. 5)、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が比較的小さい ($-23.79 \sim$

-25.65% ; Fig. 5)。陸棚斜面上部において洪水直後に漁具が泥に埋まった被害が確認された地点で洪水から 3 年後に採取された海底表層堆積物 (試料 3-9; Fig. 5) では、洪水直後と比較して減少しているものの TOC 量は高く ($1.84 \sim 2.11\%$; 試料 3-9, 0~2 cm, 2~4 cm, 4~6 cm; Fig. 5)、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は海底表層に近いほど小さい ($-22.14 \sim -25.06\%$; 試料 3-9, 0~2 cm, 2~4 cm, 4~6 cm; Fig. 5)。沙流川沖の凹地以外の陸棚と静内川沖の陸棚では、TOC 量は低く 1% 未満であり、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は泥質な堆積物で比較的大きく細粒~粗粒砂で小さい (Fig. 5)。

3. 柱状堆積物試料の TOC 量・ $\delta^{13}\text{C}$ 値

コア試料 4-1 の TOC 量と $\delta^{13}\text{C}$ 値は、それぞれ $0.57 \sim 1.86\%$ 、 $-24.87 \sim -25.93\%$ である (Fig. 3)。TOC 量はシルト質粘土層下部の深度 13~14 cm で一度減少し、3~13 cm で上方へ増加する (Fig. 3)。 $\delta^{13}\text{C}$ 値に顕著な層序的变化は認められないが上方へ連続的にわずかに大きくなる (Fig. 3)。

同じく凹地内から採取されたコア試料 4-2 の TOC 量と $\delta^{13}\text{C}$ 値は、それぞれ $0.80 \sim 3.10\%$ 、 $-24.62 \sim -26.70\%$ である (Fig. 4)。TOC 量は深度 19~21 cm のシルト質粘土層で上方へ減少し、中粒砂層の上位にある砂質シルト層で増加した後、13~15 cm のシルト質粘土層で再び連続的に減少する (Fig. 4)。コア基底付近の深度 22~23 cm には植物片の密集層が認められており、この層準では TOC 量が $2.40 \sim 3.10\%$ と非常に高い (Fig. 4)。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は上方へ大きくなり、中粒砂層を挟んで上位にある砂質シルト層で再び上方へわずかに大きくなるが、それよりも上位では層序的变化がほとんど認められない (Fig. 4)。

Fig. 5. TOC contents and $\delta^{13}\text{C}$ values of the sea-floor sediments.

考察

1. 海底表層の洪水堆積物の特徴

洪水直後に沙流川沖内側陸棚および新冠川河口周辺から採取された洪水堆積物では、 $\delta^{13}\text{C}$ 値が比較的小さい試料が多いことから、これらの堆積物には陸源有機炭素の寄与が大きいと考えられる (Fig. 5)。これらの堆積物は泥分が高く、肉眼でも笹の葉や草本類など緑色を残している植物片を多く含むことが観察されている。また、沙流川沖内側陸棚の凹地内では、海底を調査したサイドスキャンソナーの記録にハンモック状の構造が認められている (池原ほか, 2006b)。以上の観察・分析結果は、台風 10 号による河川からの洪水流が海域に流出した際に輸送された陸上植物片などに由来する陸源有機炭素が、河口とその沖合の陸棚に堆積したことを示す。さらに、沙流川沖内側陸棚および新冠川河口周辺から洪水直後に採取された洪水堆積物では TOC 量も多い (Fig. 5)。 $\delta^{13}\text{C}$ 値が比較的小さく TOC 量が多い結果は、洪水流により海域に輸送された陸源有機炭素の寄与が TOC 量を増加させていることを示すと考えられる。洪水の 2 年後および 3 年後に採取された海底表層堆積物では、泥～粗粒砂が分布す

る河口周辺～陸棚と比較して、おもに泥と極細粒砂が分布する沙流川と厚別川沖合の陸棚上の凹地内および静内川河口から採取された試料の TOC 量が高く、 $\delta^{13}\text{C}$ 値も比較的小さい (Fig. 5)。凹地内の堆積物のこれらの値は、陸源の有機炭素の寄与が大きいことが TOC 量を増加させていることを示すと考えられ、これらの特徴は洪水直後に採取された海底表層堆積物と類似している。片山ほか (2007a) では、凹地内に分布する泥は 2003 年の洪水起源の可能性が高いが、洪水直後に内側陸棚に分布していた洪水起源の泥のほとんどは波浪や流れの影響により流出したと考えられている。本研究の有機炭素分析結果でも、洪水直後と同様の特徴を示す堆積物は洪水の 2～3 年後には凹地内のみ保存されていることが示された。これらの結果は、片山ほか (2007a) の指摘と調和的である。陸棚斜面上部において洪水直後に採取された海底表層堆積物でも、洪水の影響のない通常時の陸棚斜面堆積物と比較すると TOC 量が多い (Fig. 5)。この地点の堆積物も泥分が多く牧草を含むことから、河口とその沖合の内側陸棚に堆積したものと同様の台風 10 号による洪水堆積物が陸棚斜面上部にまで運搬されたことにより、洪水の影響のない通常の陸棚斜面堆積物よりも TOC 量が多くなったと考えられ

Fig. 6. TOC contents, $\delta^{13}\text{C}$ values, and terrigenous organic carbon ratio of flood and normal sediments from the river mouth, shelf and slope. Broken lines indicate the average terrigenous organic carbon ratio of each environment.

る。 $\delta^{13}\text{C}$ 値は通常時の陸棚斜面堆積物と同程度かわずかに小さいため、有機炭素の起源としては陸源のほか海洋プランクトン起源も混入していることを示す。この結果から、陸棚斜面上部の洪水堆積物は、洪水流が海域に到達した後、海底に堆積していた海洋プランクトン起源の有機炭素を含む堆積物を巻き込みながらさらに沖合に流下し形成されたと考えられる。洪水の3年後に同じ地点から採取された堆積物にも、TOC量と $\delta^{13}\text{C}$ 値には同じ特徴が認められていること (Fig. 5) から、洪水時に堆積した堆積物が少なくとも3年後まで保存されたとと言える。

2. 海底表層堆積物の有機炭素量・陸源有機炭素の割合

海底表層堆積物試料のうち採取時期と堆積物の特徴から洪水堆積物であることが判明している試料 0-1, 試料 0-2, 試料 0-3, 試料 0-4, 試料 0-5, 試料 0-6, 試料 2-6, 試料 3-6 (片山ほか, 2007a), 試料 3-7, 試料 3-8 (片山ほか, 2007b), 試料 3-9 のコア深度 0~2 cm (片山ほか, 2007b) の結果を Fig. 6 の左に、これら以外の洪水の影響を受けていない、あるいは洪水直後には洪水堆積物が分布していたがその後の波浪と流れにより流出したと見られる地点の結果を Fig. 6 の右に示す。有機炭素に占める陸源の割合は、安定炭素同位体比測定結果にもとづいて前述の方法で算出した (Fig. 6)。

洪水の影響を受けていないと見られる通常時の堆積物では、陸棚斜面上部~陸棚~河口周辺の堆積環境へ $\delta^{13}\text{C}$ 値が小さくなる (Fig. 6)。これは、河口周辺に河川から流入した比較的同位体比の値が小さい陸上植物起源の有機炭素が多く堆積するのに対して、沖合の環境へ比較的同位体比の値が大きい海洋プランクトン起源の有機炭素の混入が増加するため

と考えられる。TOC量は陸棚斜面で比較的高く、陸棚~河口周辺の堆積環境では多くが1%未満であるが、陸棚上の凹地と河口周辺に分布する泥~極細粒砂 (試料 2-5, 試料 2-9, 試料 2-2, 試料 3-1; Fig. 5) では1%以上である (Fig. 6)。また、外側陸棚 (水深約 60 m 以深~陸棚外縁), 内側 (水深約 30 m 以浅の陸棚)・中部陸棚 (水深約 30~60 m の陸棚), 河口周辺へ浅海に向かってわずかに TOC量が増加する傾向が認められ、これは $\delta^{13}\text{C}$ 値が小さくなる傾向と調和的である (Fig. 6)。したがって、これらの堆積環境では、陸源有機物の増加によって TOC量が若干増加していると考えられる。

河口周辺、内側・中部陸棚、外側陸棚、陸棚斜面上部の各堆積環境の、洪水の影響がないと見られる通常時の堆積物に含まれる陸源有機炭素の平均値を Fig. 6 に破線で示した。洪水堆積物では、全ての試料で各堆積環境の平均値よりも陸源有機炭素の割合は高い (Fig. 6 左)。これは洪水時に河川から海域へ流入した陸上植物を含む堆積物が河口周辺から陸棚斜面に堆積したことを示し、波浪の影響が比較的小さい凹地内 (試料 3-7, 試料 3-8; Fig. 6) と陸棚斜面上部 (試料 3-9, 0~2 cm; Fig. 6) では、それらが洪水の3年後まで保存されていたことを示す。通常時の堆積物で陸源の割合が比較的高い河口周辺~内側・中部陸棚の堆積環境よりも、通常時に陸源の割合が高くない陸棚斜面上部の方が、洪水堆積物中の陸源有機炭素の増加が大きい (Fig. 6)。また、陸棚~河口周辺の通常時の堆積物では $\delta^{13}\text{C}$ 値が小さくなる傾向と TOC量が増加する傾向が調和的であり、値の変動幅が大きいものの洪水堆積物でも同じ傾向が認められる (Fig. 6)。これは、通

常時に河川から海域へ供給され堆積する陸源有機物が TOC 量を増加させていることを示し、洪水時においても同様の効果があることを示すと考えられる。ただし、洪水時では通常時よりも TOC 量は大きく陸源有機炭素の割合も高い (Fig. 6)。これは、洪水時には河川懸濁物の運搬量の増加により、河川から海域へ供給される陸源有機物も増加するためと考えられる。

3. 洪水堆積物中の陸源有機炭素の層序的变化

コア試料 4-2 は植物片を多量に含み、下部の上方粗粒化の上位に上方細粒化する層準が認められる (Fig. 4)。これらは、ハイパーピクナイトの認定基準 (Mulder et al., 2001; 斎藤ほか, 2005) とされる堆積構造を含み、Katayama et al. (2006) および Ikehara et al. (2007) もこれらの堆積物がハイパーピクナル流の影響を受けた堆積物としている。年代測定の結果、柱状堆積物試料全体が 1950 年以降の一連の堆積物であり、さらに海底表層には 2003 年 8 月の台風 10 号の堆積物が分布している。コア試料 4-2 は台風 10 号の洪水堆積物の基底に達していないため、これをハイパーピクナイトと認定することは難しいが、以上のような堆積物の層相と年代測定の結果から、コア試料 4-2 はすべてが台風 10 号による洪水堆積物であることが支持される。同じ陸棚上の凹地内から採取されたコア試料 4-1 は、コア下部に上方粗粒化が認められないが、そのほかの特徴はコア試料 4-2 と同様であり、ごく近い地点から採取されているため、同じく台風 10 号による洪水堆積物と考えられる。

2003 年の台風 10 号が本調査地域に接近した際、沙流川では 8 月 8 日の降雨開始から少しずつ河川流出量が増加し始め、8 月 9 日午後～夜の降雨のピークから少し遅れた 8 月 9 日夜～10 日未明に流出量も急激に増加し、降雨の停止後に流出量も急激に減少した後、緩やかな減少が継続したことが観測されている (Fig. 1, 嵯峨ほか, 2004)。コア試料 4-2 は台風 10 号の洪水堆積物の基底に達していないと見られるが、このコアの最下部から黒色中粒砂層への上方粗粒化と黒色中粒砂層からシルト質粘土層への上方細粒化は、洪水による河川流出量が増大から減少へ転じたことを反映していると考えられる。すなわち、粗粒碎屑物の海域への流出量が大きかった時に相当すると考えられる黒色中粒砂層の直上と直下の層準 (コア深度 14～20 cm) では、陸源の有機炭素の割合が減少する (Fig. 4)。この層準では、含泥率の減少と粗粒化が認められ、TOC 量も減少する (Fig. 4)。これは、粗粒な堆積物が海底を流下する際に、洪水以前の通常時に海底に堆積した海洋プランクトン起源の有機炭素に比較的富む堆積物を削剥し陸源有機炭素を多く含む洪水流と混合したために、陸源の割合が減少した結果と考えられ、粗粒堆積物による希釈により TOC 量も減少したと考えられる (Fig. 4)。コア深度 13 cm 以浅のシルト質粘土層では陸源有機炭素の割合はほぼ一定であり (Fig. 4)、河川流出量がピークを過ぎた後も洪水が継続している間は、連続して陸源物質が海域へ流出し続けたことを示すと考えられる。このシルト質粘土層には堆積構造が認められず (Fig. 4)、細粒部が凹地内で泥池化して堆積した特徴はない。シルト質粘土層には顕著な上方細

粒化はなく基底や内部に侵食面も認められないことと、陸源有機炭素の割合が高く一定であること (Fig. 4) から、洪水流から継続して堆積したと考えられる。Nakajima (2006) では、海岸から約 700 km 離れた富山深海長谷の沖合から採取されたハイパーピクナイトでは、TOC 量と C/N 比が高く陸源有機物が多く含まれることが示されている。これは、本研究で日高沖の陸棚堆積物に認められた特徴と類似する。泥質部の厚い海域の洪水堆積物を認定する際には、陸源有機物の含有率が高く一定である泥層をもつことが特徴として挙げられるといえる。

コア試料 4-1 では、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の測定結果から算出された陸源の有機炭素の割合が、コア基底部から最上部までほぼ一定で変化しない (Fig. 3)。最表層の 0～2 cm で上方へ若干の減少が見られるが、これは洪水後に堆積した海洋プランクトン起源の有機炭素を多く含む堆積物と生物擾乱によって混合したことによると考えられる。コア下部の黒色中粒砂層とその直上だけではなくシルト質粘土層を通して陸源有機炭素の割合が高いことは、コア試料 4-2 と同様に粗粒碎屑物を海域へ流出する洪水流の増大時だけではなく、洪水が継続している間連続して陸源物質が海域へ流出し続けたことを反映したためと考えられる。

コア試料 4-1、コア試料 4-2 に共通して認められる特徴として、シルト質粘土層の最上部を除く下部～中部の層準では、顕著な上方細粒化や陸源有機炭素の割合の変化がないが、TOC 量が上位へ増加する傾向がある (Figs. 3, 4)。これは、洪水時と同じ起源の有機物が洪水のピーク後に多く沈積したことを示す。陸源の割合が 100% ではないことから、河川から海域へ流入し海洋表層を漂っていた河川懸濁物が沈降したハイパーピクナル流からの堆積物とは考えにくい。洪水時に河川から供給された粒子と海底堆積物の再懸濁粒子が混合したものが、海中を浮遊した後に海底に沈降し堆積した可能性が考えられる。

これらの堆積物コアは、洪水の 4 年後に採取されたことから、波浪や流れの影響が少ない堆積環境においては、洪水堆積物が保存され地層として残される可能性が高いと考えられる。洪水堆積物における陸源有機炭素の特徴を層序的变化として捉えることは、とくに泥質部が厚い堆積物に対して、地層として保存された洪水堆積物を判別する際に有用と考えられる。

結 論

1. 河口周辺、内側・中部陸棚、外側陸棚、陸棚斜面上部の各堆積環境の洪水堆積物は、通常時の堆積物よりも陸源有機炭素を多く含み、波浪の影響が比較的少ない環境では、洪水後 3 年を経過しても陸源有機炭素の割合が高い洪水堆積物が保存されている。
2. 柱状に採取された洪水堆積物では、降雨量に伴う河川流出量の変動を反映して、陸源の有機炭素の割合に変動が認められた。洪水による泥層では全体を通して陸源有機炭素の割合が高い。
3. 洪水堆積物における陸源有機炭素の層序的变化の特徴は、

地層として保存された洪水堆積物を判別する際に利用できる。

謝 辞

2005 年および 2006 年の日高沖における調査は、沿岸の漁業協同組合のご協力により行なわれました。GH04, GH06 航海では、第 2 白嶺丸の船長はじめ乗組員と乗船研究員の皆さまに大変お世話になりました。元北海道立地質研究所海洋地学部の菅 和哉氏には、海洋調査にご協力いただき、粒度分析を行なっていただきました。有機炭素分析では、東京大学大気海洋研究所の宮島利宏博士と早乙女伸枝氏にご指導とご協力をいただきました。また、匿名の 2 名の査読者と担当編集委員の榊原正幸氏のご指摘により、本稿は大きく改善されました。海底および陸上の地形図の作成には、日本海洋データセンターの 500 m メッシュ水深データと国土地理院の基盤地図情報(数値標高モデル) 10 m メッシュを使用しました。この研究には、科学研究費補助金基盤研究(B)「2003 年北海道日高洪水堆積物の海域での堆積過程と海底環境への影響の解明」(研究代表者: 池原 研), および特別研究員奨励費「タービダイト泥と半遠洋性泥の起源と堆積プロセスの解明」(研究代表者: 大村亜希子)を使用しました。以上の方々に御礼を申し上げます。

文 献

- Bouma, A. H., 1962, *Sedimentology of some Flysch Deposits*. Elsevier, Amsterdam, 168p.
- Deines, P., 1980, The isotopic composition of reduced organic carbon. In Frits, P., and Fontes, J. Ch., eds., *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, 1*, Elsevier, 329–406.
- Goñi, M. A., Teixeira, M. J. and Perkey, D. W., 2003, Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA). *Estuar., Coast. Shelf Sci.*, **57**, 1023–1048.
- 長谷川和義(Hasegawa, K.), 2004, 緒言(Preface)*, 平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査報告書(*Research Report of the Flood Disaster Caused by the Typhoon No. 10, 2003, Hokkaido*)*. 土木学会水工学委員会(Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering), 176p.
- 池原 研・片山 肇・嵯峨山 積・菅 和哉・辻野 匠・入野智久・大村亜希子(Ikehara, K., Katayama, H., Sagayama, T., Suga, K., Tsujino, T., Irino, T. and Omura, A.), 2006a, 2003 年北海道日高洪水堆積物の海域における堆積様式(Depositional pattern of the 2003 Hokkaido Hidaka flood deposits on the shelf). 月刊地球(*Chikyu*), **28**, no. 8, 512–517.
- 池原 研・片山 肇・辻野 匠・菅 和哉・嵯峨山 積・入野智久・大村亜希子(Ikehara, K., Katayama, H., Tsujino, T., Suga, K., Sagayama, T., Irino, T. and Omura, A.), 2006b, 河川から供給された洪水堆積物の海域での堆積とその保存ポテンシャル—日高沖の例—(Flood deposits on the inner shelf and their preservation potential: An example of 2003 Hidaka Flood). 日本堆積学会 2006 年例会講演要旨(2006 *Ann. Meet. Sediment. Soc. Japan, Abstr.*), O16.
- Ikehara, K., Katayama, H., Sagayama, T., Suga, K., Irino, T. and Omura, A., 2007, Hyperpycnal transport of terrigenous materials from river to ocean: an example of the 2003 Hokkaido Hidaka Flood. *AGU Fall Meet. Abstr.*
- Jasper, J. P. and Gagosian, R. B., 1990, The source and deposition of organic matter in the Late Quaternary Pigmy basin, Gulf of Mexico. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 1117–1132.
- 海上保安庁水路部(Hydrographic Department, Maritime Safety Agency), 1982, 5 万分の 1 沿岸の海の基本図「苫小牧東部」および同海底地形地質調査報告(*Bathymetric Chart, Eastern Part of Tomakomai*). 海上保安庁 (Maritime Safety Agency), 43p.
- Katayama, H., Ikehara, K., Tsujino, T., Suga, K., Sagayama, T., Irino, T. and Omura, A., 2006, Deposition and preservation of the flood sediments caused by the Typhoon 200310 on the shelf off Hidaka, Hokkaido, Japan. *17th Int. Sediment. Cong. Abstr.*, P-110.
- 片山 肇・池原 研・菅 和哉・嵯峨山 積・入野智久・辻野 匠・井上卓彦(Katayama, H., Ikehara, K., Suga, K., Sagayama, T., Irino, T., Tsujino, T. and Inoue, T.), 2007a, 北海道日高沖陸棚上における 2003 年洪水後の表層堆積物分布(Distribution of surface sediments after the 2003 flood on the shelf off Hidaka, southern Hokkaido). 地質調査研究報告(*Bull. Geol. Surv. Japan*), **58**, No.5/6, 189–199.
- 片山 肇・池原 研・菅 和哉・嵯峨山 積・大村亜希子・入野智久・辻野 匠・井上卓彦・野田 篤(Katayama, H., Ikehara, K., Suga, K., Sagayama, T., Omura, A. and Irino, T.), 2007b, 日高沖洪水堆積物～特に沙流川沖凹地内の堆積物と沖合への影響について(Flood sediments off Hidaka: Characteristics of sediments in the depression off the mouth of Saru River and influence to offshore). 日本堆積学会 2007 年例会講演要旨(2007 *Ann. Meet. Sediment. Soc. Japan, Abstr.*), O17.
- Lowe, D. R., 1982, Sediment gravity flow: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Jour. Sediment. Petrol.*, **52**, 279–297.
- Milliman, J. D., 1991, Flux and fate of fluvial sediment and water in coastal seas, In Moutou, R. F. C., Martin, J. M. and Wollast, R., eds., *Ocean Margin Processes in Global Change*, John Wiley and Sons Ltd., 69–89.
- Mulder, T. and Alexander, J., 2001, The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, **48**, 269–299.
- Mulder, T. and Syvitski, J. P. M., 1995, Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans. *Jour. Geol.*, **103**, 285–299.
- Mulder, T., Migeon, S., Savoye, B. and Faugères, J.-C., 2001, Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean: a record of deposits from flood-generated turbidity currents? *Geo-Mar. Lett.*, **21**, 86–93.
- Mulder, T., Migeon, S., Savoye, B. and Faugères, J.-C., 2002, Reply to discussion by Shanmugam on Mulder et al. (2001, *Geo-Marine Letters* 21: 86–93) Inversely graded turbidite sequences in the deep Mediterranean. A record of deposits from flood-generated turbidity currents? *Geo-Mar. Lett.*, **22**, 112–120.
- Mulder, T., Syvitski, J. P. M., Migeon, S., Faugères, J.-C., Savoye, B., 2003, Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review. *Mar. Petrol. Geol.*, **20**, 861–882.
- Naidu, A. S., Cooper, L. W., Finney, B. P., Macdonald, R. W., Alexander, C., Semiletov, I. P., 2000, Organic carbon isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$) of Arctic Amerasian Continental shelf sediments. *Int. Jour. Earth Sci.*, **89**, 522–532.
- Nakajima, T., 2006, Hyperpycnites deposited 700 km away from river mouths in the central Japan Sea. *Jour. Sediment. Res.*, **76**, 60–73.
- Nagao, S., Usui, T., Yamamoto, M., Minagawa, M., Iwatsuki, T. and Noda, A., 2005, Combined use of $\Delta^{14}\text{C}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values to trace transportation and deposition processes of terrestrial particulate organic matter in coastal marine environments. *Chem. Geol.*, **218**, 63–72.
- 野田 篤・片山 肇(Noda, A. and Katayama, H.), 2005, 根室沖と日高沖の表層堆積物の特徴(Characteristics of surface sediments off the Nemuro and Hidaka area)*. 「千島弧—東北日本弧会合部の海洋地質学的研究」平成 16 年度研究概要報告書—根室沖・

- 日高沖海域一, 地質調査総合センター速報(Preliminary Report on Researches, *Geol. Surv. Japan, AIST*), **33**, 73–83.
- 野田 篤・片山 肇(Noda, A. and Katayama, H.), 2013, 日高舟状海盆表層堆積図(*Sedimentological Map of Hidaka Trough*). 海洋地質図, 81(CD), 産業技術研究所地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST).
- Omura, A., Hoyanagi, K. and Ishikawa, S., 2006, Effect of depositional processes on the origin and composition of organic matter: examples from the Pleistocene sediments in the Choshi core, Boso Peninsula. *Island Arc*, **15**, 355–365.
- 大村亜希子・池原 研(Omura, A. and Ikehara, K.), 2014, 半遠洋性泥の有機炭素沈積流量変化, 最終氷期末期～後氷期, 南海トラフ沿い前孤海盆の例(Accumulation rate of organic carbon in hemipelagic mud, examples from the forearc basins along the Nankai Trough Japan during the last glacial maximum to deglaciation). 堆積学研究(*Jour. Sediment. Soc. Japan*), **73**, 121–135.
- Plink-Björklund, P. and Steel, R. J., 2004, Initiation of turbidity currents: outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites. *Sediment. Geol.*, **165**, 29–52.
- Rau, G. H., Sweeney, R. E. and Kaplan, I. R., 1982, Plankton 13C: 12C ratio changes with latitude: differences between northern and southern oceans. *Deep Sea Res.*, **29**, 1035–1039.
- 嵯峨 浩・藤田睦博・八田茂実・清水康行・田中 岳(Saga, H., Fujita, M., Hatta, S., Shimizu, Y. and Tanaka, T.), 2004, 2 章 流出特性(Characteristic of discharge)*. 平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査報告書(*Research Report of the Flood Disaster Caused by the Typhoon No. 10, 2003, Hokkaido*)*, 土木学会水工学委員会(Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering), 176p.
- 齋藤 有・田村 亨・増田富士雄(Saitoh, Y., Tamura, T. and Masuda, F.), 2005, タービダイト・パラダイムの革新的要素としてのハイパービクナル流とその堆積物の特徴(Characteristics of hyperpycnal flow and its deposits as an innovative factor for the turbidite paradigm). 地学雑(*Jour. Tokyo. Geogr. Soc.*), **114**, 687–704.
- 斎藤文紀・池原 研(Saito, Y. and Ikehara, K.), 1992, 河川から日本周辺海域への堆積物供給量と海域での堆積速度(Sediment discharge of Japanese rivers, and sedimentation rate and carbon content of marine sediments around the Japanese Island). 地質ニュース(*Chishitsu News*), **452**, 59–64.
- 阪口 豊・高橋 裕・大森博雄(Sakaguchi, Y., Takahashi, Y. and Omori H.), 1986, 日本の川<日本の自然 3>(*Nature in Japan 3*). 岩波書店(Iwanami Shoten), 248p.
- 佐藤智之・内田康人・奥水健一・片山 肇・池原 研(Sato, T., Uchida, Y., Koshimizu, K., Katayama, H. and Ikehara, K.), 2013, 石狩低地東縁断層帯の海域への延長(The offshore extension of the active fault along the eastern margin of the Ishikari lowland, Hokkaido, Japan). 活断層研究(*Active Fault Res.*), **39**, 17–28.
- Showers, W. J. and Angle, D. G., 1986, Stable isotopic characterization of organic carbon accumulation on the Amazon continental shelf. *Cont. Shelf Res.*, **6**, 227–244.
- 菅 和哉・嵯峨山 積・檜垣直幸(Suga, K., Sagayama, T. and Higaki, N.), 1997, 北海道沿岸域の地質・底質環境-1-太平洋西海域(Environment of submarine geology in the coastal area of Hokkaido -1-: west part of the Pacific Ocean). 地下資源調査所調査研究報告(Spec. Rep., Geol. Surv. Hokkaido), **28**, 61p.
- 高山茂美(Takayama, S.), 1974, 河川地形(*Fluvial Morphology*)*. 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 304p.
- 辻野 匠・井上卓彦(Tuzino, T. and Inoue, T.), 2012, 日高舟状海盆海底地質図(*Geological Map of Hidaka Trough*). 海洋地質図, 77(CD), 産業技術研究所地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST).
- Tyson, R. V., 1995. *Sedimentary Organic Matter*. Chapman and Hall, London. 615 p.
- Usui, T., Nagao, S., Yamamoto, M., Suzuki, K., Kudo, I., Montani, S., Noda, A. and Minagawa, M., 2006., Distribution and sources of organic matter in surficial sediments on the shelf and slope off Tokachi, western North Pacific, inferred from C and N stable isotopes and C/N ratios. *Mar. Chem.*, **98**, 241–259.
- 山下俊彦(Yamashita, T.), 2004, 7 章 沿岸域での細粒土砂の挙動(Transportation of fine sediments in coastal marine)*. 平成 15 年台風 10 号北海道豪雨災害調査報告書(*Research Report of the Flood Disaster Caused by the Typhoon No. 10, 2003, Hokkaido*)*, 土木学会水工学委員会(Committee on Hydrosience and Hydraulic Engineering), 176p.
- [URL1] 国土交通省(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), 水文水質データベース(Water Information System), <http://www1.river.go.jp>

* English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

大村亜希子・池原 研・片山 肇・入野智久・嵯峨山 積, 2017, 有機炭素分析による沿岸域に記録された洪水堆積物の特徴-2003 年台風 10 号, 北海道日高沖陸棚の例-. 地質雑, **123**, 321–333. (Omura, A., Ikehara, K., Katayama, H., Irino, T. and Sagayama, T., 2017, Characteristics of shallow marine flood sediments by organic carbon analyses, examples from shelf sediments off Hidaka, southern Hokkaido, after the 2003 typhoon no.10. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **123**, 321–333.)

2003 年 8 月の台風 10 号による洪水時に, 北海道日高沖海域に堆積した洪水堆積物の特徴を有機炭素分析から検討した. 河口周辺, 陸棚, 陸棚斜面上部の各堆積環境の洪水堆積物は, 通常時の堆積物よりも陸源の有機炭素を多く含み, 波浪の影響が比較的少ない環境では, 洪水後 3 年を経過しても陸源有機炭素の割合が高い洪水堆積物が保存されていた. 柱状に採取された洪水堆積物では, 降雨量に伴う河川流出量の変動を反映して, 陸源有機炭素の割合に変動が認められた. 洪水により形成された泥層では全体を通して陸源有機炭素の割合が高く, 洪水が継続している間連続して陸源物質が海域へ流出し続けたと考えられる. 陸源有機炭素の層序的变化の特徴は, 地層として保存された洪水堆積物を判別する際に利用できる.