論 説
 Original Article

日本海 MD179 コアに見られる海水起源の砕屑物に関する研究

角和 善隆*・中嶋 健**・富山 隆将***・町山 栄章***・松本 良****

(Received May 11, 2012 ; accepted July 10, 2012)

Studies on ice-rafted debris in MD179 cores, Sea of Japan

Yoshitaka Kakuwa, Takesi Nakajima, Takayuki Tomiyama, Hideaki Machiyama and Ryo Matsumoto

Abstract : A large number of ice-rafted debris (IRD) have been found in the MD179 cores of the Japan Sea from off Joetsu to off Okushiri Island. The IRD appear in the MIS 5.4 when the last inter-glacial period passed, and occur most abundantly during the MIS 2. The occurrence of IRD in the sediments of off Joetsu indicates floated ice had commonly appeared in the further southern part of the Japan Sea than the area the former studies have expected.

Basalt lava is the most common lithology among the collected IRD, and black siliceous mudstone or chert follow it. The roundness of IRD reveals the IRD-bearing ice was not originated from on-land glacier but from sea ice formed on sea shore. The sea ice has been expected to come from southern part of the Sikhote-Alin area of the Asian Continent across the Japan Sea (Ikehara, 2003), but the lithology of IRD indicates the coast along the Japanese Islands is not precluded from the provenance area. The high frequency of IRD in the sediment of off Joetsu during the MIS 2 strongly suggests the floated ice had arrived in the further southern part of the Japan Sea. The formation and melting of sea ice in a wide area of the Japan Sea should have had a great influence on the environment of the Japan Sea and the surrounding land areas.

Keywords : ice-rafted debris, sea ice, glacial age, Sea of Japan, climate change

1. 序

Iced-rafted debris (IRD) は、冰山や海水などにより運ばれた粗粒砕屑物が氷の融解によって供給源地から離れた地域に供給されたものである。これらの存在はその海域に流水があったことを示し、気候の指標となる。例えば、大西洋ではグリーンランド氷床コアの $\delta^{18}\text{O}$ 値の変動パターンから、最終氷期においては数十年で急速に温暖化し、数百年から千数百年で次第に寒冷化するという急激な気候変動周期の繰り返しであるダンスガード-オシュガーサイクルが、そしてそのまとまりである数千年から一万数千年周期のボンダサイクル (Dansgaard *et al.*, 1993 ; Bond *et al.*, 1993) がそれぞれ認められ、そのボンダサイクル最寒冷期の後に IRD を供給する氷山流出事件であるハインリッヒイベントで終了している、とされている (Heinrich, 1988; Broecker *et al.*, 1992 ; Bond and Lotti, 1995)。IRD の礫種の検討から、氷山を流出させた氷床はアメリカ大陸本土のローレンタイド氷床とアイスランド島、セントローレ

ンス島などの起源であることが明らかにされている (Bond and Lotti, 1995 ; Fronval *et al.*, 1995)。

現在の日本海には流水はほとんど見られない。しかし、ここ 16 万年の日本海の堆積物においては、特に寒冷な氷期に IRD が発見され、その意義について Ikehara (2003) および Ikehara and Itaki (2007) により議論されている。それらの先行研究では、最終氷期の海水の南限は松前海台周辺であり、男鹿半島沖にまで広がったこともあった、ことを報告している (Fig. 1)。また、その IRD の産状には数千年の周期性はあるが、その周期は地球規模の気候変動の周期とは一致せず、地域的な冬期モンスーンの影響によるものとした (Ikehara, 2003)。一方で、Ikehara and Itaki (2007) は IRD の高い濃集ピークとハインリッヒイベントは同期しているとした。

2010 年に行われた R/V Marion Dufresne による日本海のガスハイドレート調査では、数多くの長尺コアが採取された (Fig. 1)。そしてそれらのコアからは、Ikehara (2003) の報告より南方の上越沖のコアからも、数多くの IRD を発見することができた。そこで、主に上越沖という特定地域に集中して採取された複数のコアに基づき、IRD の産状観察の手法からはじめ、産出層準や礫種などの特徴を記載し、上越沖 IRD の意義について考察を行う。

* 東京大学 University of Tokyo

** 産業総合研究所 GSJ-AIST

*** 海洋研究開発機構 JAMSTEC

**** 東京大学 (現:明治大学, 北見工業大学) University of Tokyo (present: Meiji University, Kitami Institute of Technology)

Fig. 1 Locality map showing the studied cores of the MD 179 cruise in the Japan Sea (solid circle). The open circles are the locality of the cores in which Ikehara (2003) has studied ice-rafted debris. Arrows indicate the present surface currents in the zone of the temperature between 5 to 10°C during a winter season. Hatched area represents the zone where sea surface temperature in a winter season is below 0°C. The current and the temperature of sea surface in a winter season is followed after the National Atlas of Japan (Geographical Survey Institute, 1990).

2. 手 法

IRD の産出頻度の測定について、コア記載や他の分析過程で偶然に発見されたもの以外に、先行研究ではコアから薄く切り取った試料をソフト X 線で撮影して、固結した岩石と未固結の堆積物の X 線に対する透過率の相違を用いて確認することが行われた (Ikehara, 2003)。本研究においては内径 10 cm、長さ 1.5 m に半割・切断したコア全体を連続的に撮影した X 線 CT スキャナ画像と、半割コアから厚さ 1 cm 程度、幅 5 cm、長さ 20 cm で連続的に採集した試料のソフト X 線画像の両者を用いて、IRD の産状の比較観察を行った。また、ソフト X 線画像で見られた IRD 状の陰影の原因を確認するため、堆積物試料を採取、水洗して検討した。本稿では実際に採取した IRD、ソフト X 線画像および X 線 CT スキャナ画像で判定した IRD の 3 つについて比較し、IRD の産出層準についての考察を行う。なお採取試料のうちで、軽石粒は円磨されていても IRD からは除外した。

X 線 CT スキャナは高知コアセンター所属の Hitachi Medical Co. 製を使用し、120 keV、scanogram モードで撮影を行った。またソフト X 線撮影装置は、産業総合研究所所属の綜研ソフロン製を使用し、4 mA、40 kVp の条件で、digital 撮影装置で画像を撮影した。

3. X 線 CT スキャナおよびソフト X 線画像における問題

X 線 CT スキャナの画像では 1 本のコアについて、一部を採取したソフト X 線画像より連続的に、大きな体積を

もとにして IRD の存在を確認できるという利点がある。たとえば、微細葉理が連続的に発達する場所は、下記のように主として続成作用で形成された黄鉄鉱が少なく、体積が大きい分多くの IRD が確認できた (Fig. 2)。しかし、解像度が高くないため、砂サイズ以下の粒子に関してはその実体の識別が困難である。

ソフト X 線画像では、X 線 CT スキャナ画像よりも解像度が良く、より微細なものも明確に見える。しかし、黄鉄鉱で置換された生痕化石が発達する部分では、砂粒と生痕化石の断面の識別は困難なことがある。厚みがある試料を用いているため、より立体的に捉えられる X 線 CT スキャナ画像との併用によって斜めに伸びた生痕の一部として識別可能な場合もあったが、必ずしも多くはない。またソフト X 線画像上で細粒砂に見えたものが (Fig. 3)、試料を採取し水洗すると黄鉄鉱に置換された、あるいは覆われた有孔虫や黄鉄鉱の小さな塊であったことがしばしばあった (Fig. 4)。さらに、画像で見られた中～粗粒砂でも、黄鉄鉱でセメントされた複数の有孔虫殻や珪藻などの微化石の塊、貝殻、植物片などであったこともある (Fig. 5)。微化石と黄鉄鉱からなる塊の最大のものは 6 mm、黄鉄鉱化し

Fig. 2 A dozen of IRD are counted in the image of X-ray CT scanner (left), while only one IRD is found in the image of Soft X-ray (right) of the same position. MD179-3312, section 4, TL2. Scale is 1cm.

Fig. 3 Soft X-ray image of MD179-3312, section 13. A lot of sand-sized to silt-sized dark spots commonly appears in the X-radiographs of the sediments of MD179 cores. Hydraulic elutriation demonstrated that a lot of dark sandy spots in the image were not IRD, but pyritized foraminifers. Scale is 1 cm.

Fig. 4 Dark sandy spots of fine sand size in a soft X-ray radiograph are found to be aggregates of pyrite and pyrite-filled shells of foraminifer after a hydraulic elutriation. These sandy spots occur in poorly oxygenated sediments that are characterized by the discontinuous laminations and few minute burrows. MD179-3312, section 6. Scale is 0.3 mm.

Fig. 5 Foraminifers are cemented with pyrite. This aggregate is large enough to be misunderstood as a granule-size IRD in X-ray radiographs. MD179-3312, section 9. Scale is 0.3 mm.

た木片には 1 cm を超えるものも採集した。このように、X 線 CT スキャナ画像やソフト X 線画像では、IRD とさまざまな他のものとの区別が非常に困難である。そこで、X 線 CT スキャナおよびソフト X 線画像を用いて IRD 数の測定では、IRD 以外を排除することを目的として、粒子の形態がより見やすい直径 2 mm 以上のものに限った。その結果、砂サイズ以下の IRD を排除することになり、IRD の産出層準の検討では実際より少なく認定されただろう。また、2 mm より大型の IRD ではないものを誤って数えている場合も、必ずしも排除できてはいないだろう。

4. IRD の産出層準

4.1 IRD の認定

IRD の産出層準について、(1)IRD 試料を採取したもの、(2)ソフト X 線画像で判定したもの、(3)X 線 CT スキャナで判定したもの、の 3 つに区分して以下に記載する。(1)は実際に試料を入手しているので確実であるが、IRD の堆積と発見の両方の偶然性に左右される。採取試料は船上でのコア記載や堆積物採取の過程や、陸上でのさまざまな分

析過程などで発見したものである。X 線画像では IRD は基質である泥層より X 線を通しにくい。しかし、黄鉄鉱も同様に通しにくいので、細長い生痕や不定形の集合体と判断できたものは除いた。(2)のソフト X 線画像は解像度の点で X 線 CT スキャナよりは高いが、撮影試料を採取した一部に限られるという欠点がある。ソフト X 線画像で見ると、IRD は黄鉄鉱に比べて X 線の透過率がやや高いようであるが、確実に見分けることができる保証はない。(3)の X 線 CT スキャナ画像は、解像度の問題で誤ったものを数えている可能性を否定できないが、より大きな体積をもとにコア全体を見渡している点が長所である。

X 線 CT スキャナは、ほぼ全部の長いコアについて撮影を行ったが、各コアとの対比のために微細葉理層 (TL 層) がきちんと判定でき、層序の乱れのない 3296, 3299, 3304, 3312, 3313 について IRD を検討した。3299 については、TL2 層準に角礫からなる地滑り堆積物がはさまれているが、その部分を除けば大きな支障はない。(2)のソフト X 線写真を検討したのは 3296 と 3312 の 2 本のコアである。なお、各コアの TL の認定は角和ほか (2013a, 2013b) による。

4.2 採取した IRD の層準

詳細に調べた 3312 を例に見ると、TL1 の下から AT の間に産するものももっとも多い (Fig. 6)。この傾向は他のコアを加えると、より明瞭である。特に TL1 の下部から TL2 の上部に多い。次に TL5 から 14 の間にも IRD が目立って見られる。より下位では TL18 直下とコアの最下部 TL25 の下位で見つけられた。

3296 では TL2 と 3 の間、TL7, TL10 のそれぞれ下位で採取されている (Fig. 6)。

3299 では TL2 の上部で 1 個採取した。もう 1 個は海底地滑り堆積物の最下部ないし下位 TL2 の直上に相当する部分から採取されている (Fig. 6)。この地滑り堆積物の中から AT の礫が確認されており、地滑り層の構成物は TL2-4 層準のものであろう (角和ほか, 2013a, 2013b)。

3304 においては TL2 の最上部に位置する Jo-1 の直上と、TL2 の中部で採取されている。またテフラ SK の直下に孤立して 1 つ出現する。これは船上でのコア記載によるもので、実際に採取されてはいないので詳細は不明である (Fig. 6)。

3307 は大型の CASQ であるので、他のピストンコアと比較して採取した堆積物の体積が大きく、発見された IRD の量について単純に他のコアと比較することはできない。IRD の産出層準としては Jo-1 の下位、すなわち TL2 層準であることは、他のコアと共通である (Fig. 6)。

3313 では 1 試料しか採取されていない (Fig. 6)。これは Jo-1 に直接食い込むような産状を示し、Jo-1 の堆積直後、TL2 最上部であることを示す。

3317 では直接的に層準を示すデータはないが、上部の IRD は TL2 層準と思われる (Fig. 6)。一方、下部の IRD の時代は確定できていない。葉理が見られることや IRD が多産することから TL2 層準の可能性はあるが、1 つ前

Fig. 6 Stratigraphic columns showing the horizons of collected IRD in the MD179 cores. An IRD in the bottom of the MD179-3304 is not collected.

の氷期のものの可能性も否定できない（角和ほか，2013a，2013b）。

3326では他のコアと比較して，非常に多くのIRDが採取できているが，このコアでは明確に時代を示すものがない（Fig. 6）。しかし，表層からTL1とTL2の間までの可能性が高いだろう。また採掘場所の海底深度が他のコアと相違して浅く，砕屑物が層を成していることもある。そこで，明確に成層している部分からの試料採取は避けたが，IRDとしたものの一部には水流により移動したものが含まれている可能性を否定できない。

3329では，IRDはAso-4とToyaの下位から採取されている（Fig. 6）。このコアは非常に遅い堆積速度であり，これらIRDは上越沖の他のコアとは異なり，1つ前の氷期のものであろう（角和ほか，2013a，2013b）。

今回のコアで採取した最も大きな（最大径）IRDは，3329の59 mmである。これはMD179では最も北の奥尻沖のコアで，他のコアとは層準も異なる。また上越沖では3317の27 mmであるが層準が不確定である。次に3313のTL2層準の最上部から25 mmのものが採取されている。3312ではTL2層準のものがやや大きいようにも見える（Fig. 7）。

4.3 ソフトX線画像で判定した場合

3312では実際に試料を採取した層準とソフトX線画像で判定した結果はほとんど一致する（Fig. 7）。黄鉄鉱の塊

のないTL2層準では，1 mm程度の陰影もIRDと考えてよいだろう。TL6からTL14にかけて実際にIRDが採取され，X線CTスキャナ画像でも陰影が見られているが，ソフトX線画像では確認できていない。これは実際にソフトX線画像上では砂状のものは見られるが，写真を撮影した試料の一部を水洗してもIRDと認定できるものは得られなかったからである。ただし，細粒砂サイズの尖った火山ガラス，石英，長石などは含まれている。これらを成層していない火山灰と判断したが，細粒なIRDを含む可能性もあるだろう。また，水洗したのは砂状物の陰影が見られた付近の試料の一部であり，全体を水洗していないので，偶然入手できなかったのかもしれない。

3296もTL2層準の上部に数多く陰影が見られ，これは3312と共通である（Fig. 7）。またTL7の直上と10の上位にIRDは採取されているが，ここでもソフトX線画像では2 mm以上の大きさのものは確認されていない。これも3312と同様のことが原因であろう。

4.4 X線CTスキャナ画像で判定した場合

採取試料およびソフトX線画像と比較すると，3312についてはTL2層準以降TL14付近についてはほとんど一致してIRDが数多く見られる（Fig. 7）。ただTL8以下のX線CTスキャナ画像では陰影が見られたが，ソフトX線画像では確認できていない。これは前記のように，IRDの産出密度が低く，ソフトX線撮影用に採取した試料に含ま

Fig. 7 Stratigraphic columns showing the horizons of collected IRD (solid circle) judged by the images of soft X-ray (right) and X-ray CT scanner (left).

Table 1 Number of samples showing the list of rock types of collected IRDs.

	off Joetsu	3307C	Joetsu all	3326	3329
basaltic lava	12 (35%)	3 (43%)	15 (37%)	16 (39%)	3 (25%)
silicified tuff	3 (9%)	2 (29%)	5 (12%)	5 (12%)	0 (0%)
dacite lava	3 (9%)	0 (0%)	3 (7%)	3 (7%)	0 (0%)
black siliceous rock	8 (24%)	1 (14%)	9 (22%)	11 (27%)	1 (8%)
calcareous rock	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	6 (50%)
sandstone	4 (12%)	1 (14%)	5 (12%)	4 (10%)	1 (8%)
red chert	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (5%)	0 (0%)
unidentified	4 (12%)	0 (0%)	4 (10%)	0 (0%)	1 (8%)
total	34	7	41	41	12

れなかったためであろう。より下位では、TL19 から TL21 でも少ないが X 線 CT スキャナ画像上では存在する。TL21 層準では陰影は 5 mm 以上の大きさであり、これは誤認の可能性は低いであろう。

IRD を採取した層準の少ない他のコアでは比較できないが、3312 と比較すると、3296 や 3299 では特に TL17 から 18 の層準に集中して陰影が見いだされている。また、多くのコアでは AT の下位では上位に比べて IRD が少ない傾向があるが、3313 では高い頻度で見られる。X 線 CT スキャナで多くの陰影が見られる場合は、すでに述べたように撮影対象の体積が大きいためであるか、黄鉄鉱化したより大きな生痕や黄鉄鉱の塊などを加えてしまっているのかは分からない。

5. 礫の特徴

5.1 礫種

採集した IRD の種類については、一部代表的な試料について岩石薄片を作製し、多くは薄片鑑定を参考に肉眼で分類をした。その結果、上越沖では玄武岩質～安山岩質溶岩（黒色溶岩）、黒色珪質岩が多く、珪化された凝灰岩、砂岩が次ぐ（Table 1）。黒色溶岩の斑晶鉱物は一般に非常に細粒で、鑑定はできなかった。黒色珪質岩（チャートから珪質泥岩）も隠微晶質で、珪藻や放散虫などの珪質生物遺骸は確認できなかった。なお、黒色の溶岩と珪質岩との肉眼での判定は、困難なことが多かった。

一方、層準が異なる奥尻沖の 3329 では上越沖のものと大きく異なり、砂の葉理を伴う石灰岩の角礫が半数を占めるのが特徴的である。この石灰質礫には、方解石に置換された珪藻やナノ化石が散在する。ただし、この石灰質礫は同じ層準に 4 個、もう 1 層準 32 cm 下位に 2 個と特定層準に集中して見つかった。

上越沖の各コアと津軽沖西方の 3326 を比較すると、見つかった IRD の種類については、特別大きな相違は見られない。

5.2 円磨度

礫の円磨度は visual chart (Powers, 1953) を用いて分類し、very angular から subangular を「angular」に subrounded から well rounded を「rounded」としてまとめた (Table 2)。その結果、CASQ 試料の 3307 を加えた上越沖の IRD は、「rounded」とした試料が 3/4 近くを占める。津軽沖

Table 2 Number of samples showing the roundness of collected IRDs.

	off Joetsu	3307C	Joetsu all	3326	3329
rounded	24 (71%)	5 (71%)	29 (71%)	24 (59%)	6 (50%)
angular	10 (29%)	2 (29%)	12 (29%)	17 (41%)	6 (50%)
total	34	7	41	41	12

Fig. 8 1 : Rounded IRD from the MD179-3326. Core depth is 54 cm. Lower left is basalt and other three are black chert. 2 : Basalt from the MD179-3296. Core depth is 958 cm. 3 : Dacite lava from the MD179-3307. Core depth is 774 cm. 4 : Silicified tuff from the MD179-3326. Core depth is 485 cm. 5 : Sandstone from the MD179-3313. Core depth is 589 cm. 6 : An angular IRD of limestone from the MD179-3329. Core depth is 352.5 cm.

でも「rounded」が過半数を占める。奥尻沖 3329 では半々であるが、礫種と同様に石灰質礫による影響が大きく、「angular」に分類されたのは石灰質礫のみである。特定層準に集中していることも含め、石灰質礫の起源や成因はほかのものと違いがあるのかもしれない。また、全体に玄武岩質溶岩や黒色珪質岩には円磨度が高く、球形度も高いものがあつた (Fig. 8)。

6. 議 論

6.1 海洋酸素同位体ステージとの対応

上越沖各コアにおける IRD の産出層準と、海洋酸素同位体比ステージ (MIS : Martinson *et al.*, 1987) との対比を試みる。IRD の産出層準は 3312 を基準とし、3312 で採取した IRD を黒丸、他のコアで採取した IRD は TL 層を参考として 3312 の相当する層準に白丸で、それぞれ区別して記した (Fig. 9)。MIS と 3312 との対比は角和ほか (2013b) に基づく。

3312 の最下部のものは、前の氷期 MIS6 から最温暖期の 5.5 に向かう過程でのものであるだろう。次に、温暖であった最終間氷期の後からしばらくは IRD が希である。それでも、MIS 5.4 と 5.1 では X 線 CT scanner 画像の陰影として見ら

れ、MIS 5.3 では船上記載で見つっている。MIS 1 も同様に IRD は見つっており、間氷期の最温暖期を除くと、少ないとはいえ日本海の上越沖ではほとんどの時期を通して IRD を産するといえる。しかし、寒冷であった MIS4 の中部では、IRD は X 線 CT scanner でも TL18 に近い部分にしか陰影は見られない。また、しだいに寒冷になりつつある時期の、TL14 すなわち MIS 3.3 を過ぎたあたりから増加している。そして、MIS 2 の最寒冷期から MIS 1 の温暖期へ向かう過程には、最も集中して IRD が現れる。MIS 2 での産出頻度の高さを考慮すると、IRD の分布はさらに南西の海域にも広がっていただろう。

完新世に入って MIS 1 でも、3312 では IRD が複数見つけられ、3296 では X 線 CT スキャナ画像で見つっている。これらはその層準から 8,200 年前の寒冷化事件 (Alley

Fig. 9 The stratigraphic horizon of IRD collected from the MD179-3312 (solid circle) and those from some of the other cores (MD-3296, 3299, 3304, 3313; open circle) are shown together on the right of the stratigraphic column of 3312 to compare with the secular change in $\delta^{18}\text{O}$ of SPECMAP (Martinson *et al.*, 1987). IRD judged by the images of X-ray CT scanner of MD179-3312 is shown in the left of the column. Shaded part represents an interval of a thinly laminated layer.

et al., 1997; Clarke *et al.*, 2004; Kobayashi *et al.*, 2007) に対比される可能性がある。しかし、その上位にも IRD があり、いろいろな時代の小氷期を含め対応する地球規模の寒冷事件との詳細な対応はできていない。

6.2 富山沖より北方のコアとの比較

日本海の IRD を初めて検討した Ikehara (2003) の GH96-1212, GH95-1208, GH99-1246, GH96-1217 など北海道西方沖の各コアを、より北方海域の例として上越沖と比較し考察する。

Ikehara (2003) の Fig. 4 および Ikehara and Itaki (2007) の Figure 3 などに基づく、MIS 5 以降で IRD が特に多い層準は、MIS 2.21-2.23 と MIS 3.0-3.1 (TL3 の最上部から TL2 の基底部付近)、MIS 5.1-5.2 の中部 (TL21 に近い TL21-22 の間)、MIS 5.33 (TL23 の下部)、MIS 5.4 (TL24-25 の間) である。それらに次いで、MIS 3.1-3.13 (TL9-10 間)、MIS 3.13-3.3 (TL11-12 間)、MIS 3.3-3.31 (TL13-14 間)、MIS 4.22 (TL18 に近い TL18-19 間)、MIS 4.24 (TL19-20 間)、MIS 5.1 上部 (TL20-21)、MIS 5.2-5.31 (TL21 上部)、MIS 5.3 (TL22-23 間)、MIS 5.53-6 など IRD が多い。以上から、北海道西方沖では MIS 2/3 境界付近を除き LGM の最も寒い時期や MIS 4 の垂氷期には、IRD はむしろ少ない。一方、MIS 5.4-5.1 の間 (TL24-21) の間では多い、と読み取れる。

上越沖と北海道西方沖の共通点としては、TL1 の上部からも産すること、垂氷期といわれる MIS 4 でも必ずしも IRD は目だって多くないことも共通である。相違点としては上越沖では MIS 4 以前はまれだが、北海道西方沖では普通に見つかっていることであろう。X 線画像に基づく IRD の産出頻度については、全体の傾向は IRD と同様に MIS 4 以前は富山沖では少ないが、北海道西方沖では MIS 5 の TL21 層準から下位にも高い頻度の層準が見られる。これは、北方の北海道西方沖では、より南の富山沖よりも MIS 4 の垂氷期以前は海水が発達しやすかったのだろう。また、MIS 2/3 境界前後で多いことは共通するが、北海道西方沖のように境界付近に集中せず、富山湾沖では LGM 全体を通して多い。

以上の IRD の産出層準をまとめると、Ikehara (2003) が述べたように、北海道西方沖ではある程度温暖な方が海水の融解が頻繁であり、強く寒冷な時期、例えば LGM では融解が顕著でないために海底に IRD が大量に放出されなかったことを示唆する。しかし、Sakamoto *et al.* (2005) は、より北方で現在も流水が普通に見られるオホーツク海において、寒冷な MIS 2 と MIS 4 で数多くの IRD を見いだしている。これは日本海とオホーツク海との相違なのか判らない。南の上越沖では、寒冷な時期に IRD は集中し、Ikehara (2003) と比較すると、海水の形成と融解が同時に起きていると思われる。すなわち、日本海の寒暖変化は、北海道のような高緯度海域ではなく、上越沖のような南方海域の IRD を調べた方が、明瞭に知ることができる。また、上越沖より南方では、TL2 層準を特に丁寧に見ることで海水の最も広がった時期や、その南限が分かるだろう。

6.3 IRD と堆積相との関係

6.1 で考察したように、1 つ前の間氷期であるエーミアン間氷期から現在までの間では、上越沖において IRD は間氷期にはまれにしか見られず、LGM には特に集中して見つかった。すなわち、IRD は寒暖を指示する指標に使えるだろう。そこで、同じ氷期の中でも、葉理が発達する層と生痕が発達する層では、どちらが温暖あるいは寒冷なのかを IRD の算出頻度から検討する。ただし、暗色葉理層が長期的に発達し、有孔虫殻の酸素同位体比が異常な値を示す、日本海の海洋環境が通常の氷期と比べて特に異質であった TL2 から TL4 の期間 (例えば Oba *et al.*, 1991) を除いて頻度を計算した。いい換えれば、通常の氷期の海洋環境で、葉理が発達する層と生痕が発達する層の、どちらに IRD が多く産するかを検討した (Table 3)。

3296, 3299, 3304, 3312, 3313 について、実際に IRD を採取した層と X 線 CT スキャナ写真に基づいて IRD と判定した層を、微細葉理の発達する TL 層と生痕層に区分してみると TL 層は 18~33% (平均 27%) であった。すなわち、生痕層の方に IRD は多く見つかった。しかし、TL2 から TL4 の微細葉理層の厚さを除いた TL 層の厚さがコアに占める割合は、25~31% (平均 28%) である。これは、IRD が微細葉理層か生痕層かは無関係に供給されたと仮定した場合と、区別できないことを意味する。Ikehara & Itaki (2007) は、北海道西方のコアにおける観察から明色層と暗色層とでは IRD の頻度に相違はないとした。一般に生痕層は明色層に、葉理層は暗色層に対比できるが、厳密には暗色層にも生痕はある (角和ほか, 2013a, 2013b)。その点では完全な対応ではないが、両者は同じ結果であるといえる。すなわち、現在のデータでは IRD の産出頻度での TL 層、生痕層の寒暖の判断はできない。より細粒な砂サイズのものも含めた、全層準での詳細な検討が必要である。

6.4 IRD を構成する粒子の特徴と起源

一般に陸上の氷河が岩石を侵食し運搬した場合、礫は角礫が多くなると考えられるが、今回見つかった IRD の多くは良く円磨されている (Table 2, Fig. 8)。これは河川や海などの岸に分布していた砂礫が運搬されたものであると推定できる。すなわち海水が川岸、海岸あるいは浅海の海底に接して、そこにあった円磨された礫を取り込み運搬したのであろう。Ikehara (2003) は文献をもとに、日本海西北沿岸のアジア大陸や日本列島での氷河や氷床は日本海に届いていなかった、として同様の結論を導いた。ただし、今回発見した奥尻沖 3329 の石灰質礫だけは特に very

Table 3 The ratio of the counted IRD in TL layers to the whole counted IRD in each core (upper), and the ratio of the cumulative thickness of TL layers to the whole thickness of each core (lower). The data of LGM (TL2 to 4) are removed in the both calculations.

	3296	3299	3304	3312	3313	average
IRD (%)	33	18	39	30	21	27
TL (%)	31	27	26	25	29	28

angular から angular がほとんどであり、礫もほかのコアと比べて異質であることを含め、1 つ前の氷期の氷河起源を想定しても良いのかもしれない。

IRD を供給した海水の起源については、Ikehara & Itaki (2007) はロシア極東地域、日本海北西のシホテアリン、沿海州からウラジオストーク周辺を想定している。その理由として温暖期の現在も冬期に海水ができていること、冬期には強い北西モンスーンが大陸から日本列島側に吹くことで沿岸での海水の形成が促進されること、モンスーンにより水が日本列島側に移動すること、などを挙げている。北海道西方沖はともかく、上越沖も沿海州から日本海の最も広い場所を北西に横切ってモンスーンにより運ばれてきたのだろうか。

現在も海水が形成され、春には流水として北海道北東部沿岸に到来しているオホーツク海では、流水は北風とその卓越風に起因する表層海流である東サハリン海流に運ばれて移動している (Ohshima *et al.*, 2001)。現在の日本海の海流は、対馬海流が日本海南東を北上し、リマン海流が日本海北西沿岸を南下している。しかし、表層海流は夏期にはほぼ西から東へ、冬期にはやや北西からが卓越し、上越沖へは朝鮮半島北部付近からの表層海流が主要であり (国土地理院, 1990), ロシア沿海州南部とはややずれている (Fig. 1)。一方、冬期の表層水温は沿海州沿岸域では最も寒冷で 0°C 以下であり、塩分濃度も低い (国土地理院, 1990) ので、海水形成の場としては適切である。いずれにせよ、特に LGM には間宮海峡は閉塞し、リマン海流の主要部を構成するアムール川を起源とするオホーツク海の塩分の低い低温水の流入は無くなり、対馬海峡は浅く狭くなって対馬海流の勢いも減少していた (Oba *et al.*, 1991)。このように現在とは異なった環境下での日本海の表層海流は現在とはかなり異なったものであっただろうが、詳細は分からない。

IRD の礫種は海水の形成された場所、供給源を推定する 1 つの情報となる。氷床起源のものと異なり、海水により運ばれる IRD は海岸に露出している地質を反映しているだろう。上越沖の各コアと津軽沖の 3326 を比較すると、両者の IRD は格別大きな相違は見られず、供給源となる場所はほぼ同じと考えて良いだろう。一方、奥尻沖 3329 は上越沖のコアとはかなり IRD を構成する岩質が相違するように見える (Table 1)。しかし、奥尻沖の IRD が特異なのは石灰質岩の存在であり、それは特定層準に限定されている。それを除くと、玄武岩質礫があることは上越沖と共通である。今回採取された IRD には玄武岩以外に黒色珪質岩が多いが、これらは能登半島から北海道西岸にかけての古第三系、新第三系にはごく一般的なものである。その点で、採取された IRD を運んだ氷は能登半島から北海道西岸での日本列島沿岸で形成されたと考えすることは可能である。

Ikehara & Itaki (2007) が北海道西方沖コアの IRD の起源について想定したロシア沿海州南部にはジュラ紀付加体、白亜紀付加体、そして先中生界が主に分布している。そのほか、花コウ岩質深成岩類、白亜紀および古第三紀の

夾炭層、砂質岩、泥質岩が露出し、玄武岩はあるが主要要素ではない (Utkin *et al.*, 2007)。特に玄武岩については、始新世から鮮新世初期のものがロシア沿海州北東部の海岸と朝鮮半島北東部には分布するが、検討対象となっている南部では内陸部が主な分布域である (Okamura *et al.*, 1998)。その点では今回上越沖を主とする MD179 のコアから発見された IRD の礫種組成を十分には説明できない。

以上のように、海水は朝鮮半島北部を含むアジア大陸側で形成され表層海流によって運ばれて来たのか、上越地方沿岸において形成されたかの結論は現時点では出せない。しかし、最終氷期最盛期 MIS 2 には多量の IRD が上越沖に有するという事実は、たとえ後者であろうと大陸側でも広く海水は形成されていたであろうし、単純に緯度だけを考慮すると、日本海のほぼ 3/4 に海水が存在していたことになる。もし沿海州付近からまっすぐ南東に移動してきたとすると、日本海のほぼ半分の領域に浮遊していたことになる。またすでに述べたように、海水はさらに南方まで広がっていたと推定できる。海水の形成時には、酸素と塩分に富んだ冷たく重い海水が表層から深層へ供給され、融解時には冷たいが軽い淡水を表層に供給する。この海水の形成、浮遊と溶解がもたらす日本海の海洋環境、周辺陸域の環境、そしてガスハイドレートを含む堆積物などへの影響については、従来は過小評価されていたといえる。

7. ま と め

- (1) Ice-rafted debris (IRD) は MD179 航海における上越沖の各コアで普遍的に見つかり、Ikehara (2003) が想定していたより、南方海域まで海水が広がっていたことを示す。
- (2) IRD の認定は、ソフト X 線や X 線 CT スキャナの画像を用いると、実際に偶然に見つかる物に比べてより確実である。しかし、画像では解像度の問題のため、続成作用で形成される黄鉄鉱が邪魔をして誤認することが高い確率である。この誤認をどこまで減らせるかが重要である。
- (3) IRD は短い間氷期が終了すると、すぐに出現する。そして、TL2 層準を代表として、全体としては寒冷な時期ほど IRD が増加する傾向は認められる。しかし、かなり寒冷な MIS 4 では TL18 の前後にやや集中して陰影が見られるだけで、より温暖な MIS 3 より目立たない。最寒冷期の MIS 2 では、他と比べて圧倒的に多い。そして温暖な完新世にも IRD は見つげられた。
- (4) 上越沖の IRD の岩種は黒色の玄武岩溶岩が最も多く、次いで黒色珪質岩、白色の珪化した酸性凝灰岩、砂岩などが主なものである。これは時代が不明確だが津軽沖のものと類似する。一方、より北方の奥尻沖の IRD は石灰質岩が多く、玄武岩溶岩がそれに次ぐ。奥尻沖は時代が 1 つ古いので同等には論じたいが、石灰質岩を産する特定の層準以外は、礫は共通である。
- (5) 礫は円磨されている物が多く、陸上に露出した古い岩石を削ったものではなく、海岸に堆積していた砂礫を

運んだものであろう。すなわち、IRD を運んだ氷は陸上氷河起源ではなく、海岸部で形成された海水であると思われる。ただし奥尻沖の石灰質岩は円磨度が著しく低く、この礫を産する層準だけは氷河起源の可能性を排除できない。

- (6) 海水の形成場については、日本海の対岸、ロシア沿海州南部から朝鮮半島北部なのか、日本列島側なのかは決められない。しかし、海水の浮遊していた領域は、特に最終氷期最盛期には従来考えられていたより圧倒的に広く、日本海の海水や堆積物に与える影響は過小評価されてきたといえる。

謝 辞

神奈川県立生命の星・地球博物館の石濱佐栄子氏は数多くの ice-rafted debris を発見、提供していただいた。記して謝意を表します。また粗稿をていねいに読んでいただいた2名の査読者のかたがたに感謝いたします。本研究はMH21の支援のもとに行われた。

引 用 文 献

- Alley, R.B., Mayewski, P.A., Sowers, T., Stuiver, M., Taylor, K.C. and Clark, P.U., 1997 : Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology*, **25**, 483–486.
- Bond, G. and Lotti, R., 1995 : Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, **267**, 1005–1010.
- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J. and Bonani, G., 1993 : Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, **365**, 143–147.
- Broecker, W.S., Bond, G., McManus, J., Klas, M. and Clark, E., 1992 : Origin of the Northern Atlantic's Heinrich events. *Climatic Dynamics*, **6**, 265–273.
- Clarke, G.K.C., Leverington, D.W., Teller, J.T. and Dyke, A.S., 2004 : Paleohydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz and the 8200 BP cold event. *Quater. Sci. Review*, **23**, 389–407.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J., P., Sveinbjornsdottir, A.E., Jouzel, J. and Bond, G., 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218–149.
- Fronval, T., Jansen, E., Bloemendal, J., Johnsen, S., 1995 : Oceanic evidence for coherent fluctuations in Fennoscandian and Laurentide ice sheets on millennium time-scales. *Nature*, **374**, 443–446.
- Heinrich, H., 1988 : Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quat. Res.*, **29**, 143–152.
- Ikehara, K., 2003 : Late Quaternary seasonal sea-ice history of the North-eastern Japan Sea. *Jour. Oceanogr.*, **59**, 585–593.
- Ikehara, K. and Itaki, T., 2007 : Millennial-scale fluctuations in seasonal sea-ice and deep-water formation in the Japan Sea during the late Quaternary. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, **247**, 131–143.
- 角和善隆・中嶋 健・公文富士夫・松本 良・仲村祐哉・大井剛志・富山隆将・町山栄章, 2013a : 日本海 MD179 航海において採取されたコアの層相と対比－上越沖海鷹海脚周辺－. 石枝誌, **78**(1), 97–103.
- 角和善隆・中嶋 健・公文富士夫・松本 良・仲村祐哉・大井剛志・富山隆将・町山栄章, 2013b : 日本海 MD179 航海において採取されたコアの層相と対比－上越海丘から北海道南西沖まで－. 石枝誌, **78**(1), 104–112.
- Kobayashi, T., Severinghaus, J.P., Brook, E.J., Barnola, J.-M. and Grachev, A.M., 2007 : Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice. *Quater. Sci. Rev.*, **26**, 1212–1222.
- 国土地理院, 1990 : 新版日本国勢地図. <http://www.gsi.go.jp/atlas/atlas-etsuran.html>
- Martinson, D.G., Pisias, N.G., Hays, J.D., Imbrie, J., Moore Jr., T.C. & Shackleton, N.J., 1987 : Age dating and the orbital theory of the ice ages: Development of a high-resolution 0 to 300,000-year chronostratigraphy. *Quat. Res.*, **27**, 1–29.
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T., 1991 : Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanogr.*, **6**, 499–518.
- Ohshima, I.K., Mizuta, G., Itoh, M., Fukamachi, Y., Watanabe, T., Nabae, Y., Suehiro, K., Watatsuchi, M., 2001 : Winter oceanographic conditions in the southwestern part of the Okhotsk Sea and their relation to sea ice. *Jour. Oceanogr.*, **57**, 451–460.
- Okamura, S., Arculus, R.J., Martynov, Y.A., Kagami, H., Yoshida, T. and Kawano, Y., 1998 : Multiple magma sources involved in marginai-sea formation: Pb, Sr and Nd isotopic evidence from the Japan Sea region. *Geology*, **26**, 619–622.
- Powers, M.C., 1953 : A new roundness scale for sedimentary particles. *Jour. Sed. Petrol.*, **23**, 117–119.
- Sakamoto, T., Ikehara, M., Aoki, K., Iijima, K., Kimura, N., Nakatsuka, M. and Wakatsuchi, M., 2005 : Ice-rafted debris (IRD)-based sea-ice expansion events during the past 100 kyrs in the Okhotsk Sea. *Deep-Sea Research II*, **52**, 2275–2301.
- Utkin, V.P., Nevolin, P.L. and Mitrokhin, A.N., 2007 : Late Paleozoic and Mesozoic deformations in the southwestern Primorye region. *Russian Jour. Pacific Geol.*, **1**, 307–323.