放射性炭素年代測定を用いた海底土砂の長期的移動・堆積履歴の推定

Investigation on Long-term Offshore Sedimentation and Sediment Transport Using Radiocarbon Dating

伴野雅之¹・清家弘治²・小松原純子³・栗山善昭⁴

Masayuki BANNO, Koji SEIKE, Junko KOMATSUBARA and Yoshiaki KURIYAMA

Sediment deposition and the origins at water depths of 9 to 19 m at Kashima-nada Sea were investigated by radiocarbon dating the age of shells contained in the seabed core samples. The older-than-normal shells were used as tracers, which was included in sediments dumped into the sea from 1965 to 1977, to estimate the offshore sedimentation and sediment transport history. The results showed that the influence of the dumped sediments was observed even at a water depth of 19 m, and it was also indicated that the dumped sediments were not moved in relative deepwater points after the deposition and the dumped sediments eroded after the deposition in relative shallow-water points would be transported and be redeposited.

1. はじめに

水深の深い沖域における海底土砂の移動・堆積過程は数十年から数百年の非常にゆっくりとした時間スケールで進行し、通常、防災上や海岸管理上の観点からは、その影響はほとんど無視できるように思われる。しかしながら、実際には沖域の地形やその変化は波の屈折や浅水変形などにも影響を与えることから、浅海域の地形変化にも大きな影響を及ぼす。そのため、現地における沖域の海底土砂の移動や堆積状況を十分に理解することは非常に重要であり、長期的に安定した海浜の形成及び維持管理計画には必要不可欠なものである。その移動・堆積過程の理解のためには、長期間かつ高頻度で高精度な調査による沖域の地形変化に関する現況把握が必要であるが、従来の調査手法においては、予算や調査期間といった制約により、必ずしも十分にその状況や特性を把握することは難しいのが現状であった。

他方で、沖域の海底地形は人為的な影響によって大きく変化することがある。例えば、港湾の建設や航路の維持浚渫によって生じた土砂は、しばしば処分もしくは海岸侵食対策（養浜）を目的として海洋に投入されるが、大量の土砂が海洋に投入された場合には、周辺領域内の総土砂量が大きく増加し、付近の海岸では堆積が生じやすくなることが知られている（例えば、佐藤ら、1974）。しかしながら、そのように海洋に投入された土砂がどの程度の時間スケールでどの程度の水深や範囲にまで移

動・堆積し、地形変化に影響を及ぼすのかといった海洋投入土砂の移動・堆積特性もまた同様に十分に明らかにされていない。

そこで本研究では、放射性炭素年代測定法により海底土砂に混在する貝殻の年代を測定することで、数十年スケールの土砂の移動・堆積履歴の推定を試みた。具体的には、過去に陸域の掘削土砂が海洋投入された鹿島灘において複数の水深帯で採取された海底土砂試料を対象とし、各水深帯における海洋投入土砂の堆積状況を評価し、海底土砂の移動・堆積履歴を推定した。本研究は、これにより沖域における土砂の移動・堆積過程の理解を目指すものである。

2. 評価・検討手法

(1) 放射性炭素年代測定法

本研究における貝殻の年代測定には放射性炭素年代測定法を用いた。放射性炭素である ^{14}C は大気中にほぼ一定の割合で存在し、光合成などにより固定された後、環境中を循環するが、生物が死亡後は新たな ^{14}C は取り込まれず、時間とともに一定の割合で減少していく（図-1）。

図-1 放射性炭素同位体比の経時的減少を利用した年代の推定

1	正会員	修(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域沿岸土砂管理研究チーム 研究官
2		博(理)	東京大学 大気海洋研究所 助教
3		博(理)	(独法) 産業技術総合研究所 地質情報研究部門平野地質研究グループ 研究員
4	正会員	博(工)	(独法) 港湾空港技術研究所 特別研究官

本手法は、この性質を利用し、 ^{14}C の存在率からその有機物が死亡してから時間を求めるものであり、堆積学や考古学の分野において古環境の復元等に用いられている手法である（例えば、小松原・木村，2011）。 ^{14}C は半減期が5,730年であり、本手法により炭素を含む物質の年代を約60,000年前まで測定することが可能である。ただし、海洋の炭素を取り込んで形成された貝殻は通常、海洋リザーバー効果と呼ばれる年代の遅れが生じることが知られている（例えば、Shishikura et al., 2007）。これは貝殻が陸域の生物と比較して海洋を循環した古い炭素を利用することにより生じるものであり、測定値は大気中の炭素を直接取り込んだ有機物と比較して数十年から数百年程度古い年代となる。

なお、本研究においては、加速器質量分析法（AMS法）により ^{14}C の個数を計数し、 ^{14}C 濃度（ $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）を測定した。また、同位体効果の補正のために ^{13}C 濃度（ $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ）を測定した。放射性炭素年代（Libby Age, yrBP）は半減期にLibbyの半減期である5,568年を用い、1950年を基準として算出した（Stuiver and Polach, 1977）。

(2) 鹿島港建設に伴う土砂の海洋投入

茨城県に位置する鹿島港は1961年に陸域を掘削して建設される掘込港湾として建設が開始された。その建設工事に伴って約8,600万 m^3 の土砂が発生した。その内、約5,000万 m^3 もの大量の土砂が鹿島港南海浜（波崎海岸）の汀線から500m以内の浅海域に1965年から1977年にかけて海洋投入された（図-2）。その投入に伴った汀線の前進によって浜幅が大きく広がった領域の一部（鹿島港南防波堤近傍）は埋め立てられたものの、その埋立地の土量を差し引いても海洋投入された土砂量の約半分程度は海洋に流出したと考えられる。

(3) 海洋投入土砂の堆積状況の評価手法

上述のように鹿島港建設時の海洋投入土砂は陸域を掘削して発生したものであるため、地層中に含まれる古い貝殻を多く含有していたものと考えられる。これらの貝殻は、通常海底に存在する貝殻と比較して、年代が非常に古いと考えられ、本研究ではこれらの古い貝殻を海洋投入土砂の一種のトレーサーとして用い、海洋投入土砂の堆積状況を評価することとした。すなわち、一般に貝殻は扁平形状を有していることから球体形状の砂とは限界シールズ数などの移動特性は異なるけれども（熊谷ら，2009）、移動方向や堆積時期などのおおよその傾向は一致する。そのため、土砂の投入後、約50年経過した現在においてトレーサーとした古い年代の貝殻がどの程度の範囲および堆積層に分布しているかを調査することで海洋投入土砂の時間的かつ空間的な移動・堆積履歴を追跡的に推定することができると考えられる。

図-2 鹿島港南海浜への土砂の海洋投入量の推移

(4) 調査概要

過去に海洋投入された土砂に含まれていた貝殻の年代を推定するために、図-3に示す鹿島港近辺の陸上において鹿島港内の最大水深域よりもやや深い約-24mまでのオールコアボーリングを行い、不攪乱試料を採取した。採取した陸上ボーリングコア（HORS-1）については、分画した後、各層毎に無作為に貝殻を採取し、その年代を測定した。

また、海洋投入土砂由来の古い貝殻の現在の海底における空間的分布状況を評価するために、2010年7月22日、25日、26日において、図-3に示す茨城県鹿島灘の沖合の4地点（水深約19m, 15m, 12m, 9m）で約1m程度の海底コア（Core1～Core4）を採取した。また、図-3には2010年11月4日に実施した測量による採取地点周辺の海底地形を同時に示す。本研究における高さの基準は波崎港工事用基準面（T.P. - 0.687m）である。海底コアはポリカーボネートパイプの打ち込みにより採取され、採取した海底コアについても同様に各層毎に貝殻の年代を測定した。なお、年代を測定した貝殻の大きさは1cm程度のものが最も多かったが、本研究においてはその形状の違いによる詳細な検討は行っていない。また、参考情報として海底コア及び陸上ボーリングコアの深さ方向に5cm間隔で粒度分布を求めた。

3. 海洋投入土砂の性状の推定

図-4に陸上ボーリングコア内に含まれた貝殻の年代及び底質の中央粒径の分布を示す。コア内には例外的に約1.7万年～3.3万年前の貝殻が含まれていたけれども、鹿島港建設により掘削された地層は現在から約8,000年前までに構成されたものであると考えられる。また、-9m～-1mの約5,000年前～7,500年前の貝殻の存在は霞ヶ浦の形成（井内・斎藤，1993）も関係していると考えられ、これらの貝殻の年代値を除くと、貝殻の年代は深さ方向にほぼ線形的に古くなっている。このことから、地層の堆積速度は経時的に大きな変化はなく、ほぼ一定であ

図-3 対象域におけるコア採取位置及びその周辺の海底地形

図-4 陸上ボーリングコア (HORS-1) 中の貝殻の年代分布及び底質の中央粒径 (特異的に古い貝殻は紫で枠外に表記。)

たと推測でき、海洋投入土砂には約2,500年前～8,000年前の各年代の貝殻がほぼ均等な量で含まれていたと考えることができる。同時に、陸上ボーリングコア内の最も

新しい貝殻は2,500年前のものであるが、それより新しい貝殻もより海に近い地層には含まれている可能性があり、海洋投入土砂中にも2,500年前よりも新しい貝殻は含まれていたと推測される。

粒径に関しては、0.2mm以下の粒径がほとんどであり、0.13mm～0.17mmの粒径のものが特に多い。すなわち、鹿島港建設時に海洋投入された土砂の多くは比較的粒径の細かい細砂であったと考えられる。一方、-2m～-4m及び-19m以深に粒径の大きい礫などの粗粒分の堆積も見られた。なお、図中には示されていないが、-19m以深においては非常に大きい重円礫が存在しており、一部、粒径の測定はできていない。また、-17m以深には粒度分析の測定限界以下の粘土などの細粒分の堆積層も一部に見られた。

10,000年以上前の例外的に古い貝殻が存在していた堆積層は約5,000年～7,000年前の水深18m～20mであった。この層は上述したように、非常に粗い礫で構成されていたことから、通常の高浜堆積物ではないと考えられ、これらの貝殻の存在は、この層が沖積層の基底礫層であったことに起因するもの、もしくは河川などで古い堆積層が侵食され、この時期の堆積物と同時に堆積したこと

図-5 海底コア中の貝殻の年代分布及び底質の中央粒径（年代値による色分けは図-6参照。）

（再堆積）によるものであると考えられる。

4. 土砂の移動・堆積履歴の推定

(1) 海洋投入土砂の堆積状況

図-5に海底コア内に含まれた貝殻の年代及び底質の中央粒径を示す。前述のように海洋投入土砂は主に2,500年前以降の貝殻で構成され、各年代の貝殻を均等に含んでいたと考えられる一方で、全海底コア中の貝殻の年代

図-6 海底コア中の貝殻の年代頻度分布と分類（測定限界以上の新しい貝殻はModernと標記。通常の堆積過程由来と考えられるものは青、海洋投入土砂由来と考えられるものは赤、海洋投入土砂由来の可能性が高いものは緑、特異的に古い貝殻は紫で表記。）

の頻度分布（図-6）は750年前よりも新しいものが突出して多い。貝殻の年代は海洋リザーバー効果により数百年程度古い年代を示す場合があることを考慮すると、750年前よりも新しい貝殻は現在の貝殻として考えることができ、その貝殻を伴った土砂による堆積を通常の堆積過程、つまり河川からの新たな土砂供給や土砂の海洋投入以前から海岸に存在していた土砂の沖向き移動によって生じた堆積として考えることができる。一方、2,500年前～8,000年前の貝殻は陸上ボーリングコアに含まれていたことから海洋投入土砂由来のものと考えことができ、その前後である750年前～2,500年前及び8,000年前～10,000年前の貝殻は海洋投入土砂由来の可能性が高いものと考えられる。これに基づき、海底コア中の貝殻を年代毎に図-5及び図-6のように分類し、その貝殻を含む堆積層の堆積物の由来を推定した。なお、1万年前を超える特異的に古い貝殻については海洋投入土砂由来の可能性もあるが、供給源が不明確であることから、分類の対象から除外した。

この分類に基づくと、Core1においては、海洋投入土砂由来と考えられる比較的古い貝殻は表層から12cm及び30cmに含まれていた。表層から30cm付近では海洋投入土砂による堆積が生じたと考えられる一方、表層から12cmの古い貝殻は新しい貝殻と混在した状態にあったことから、表層から12cm付近の堆積物は海洋投入土砂と通常の堆積過程による土砂が同時に堆積したものと考えられる。Core2において、比較的古い貝殻は表層から約40cm以深に存在し、Core3においては、表層から30cm以深に存在していた。Core2及びCore3に関しては、いずれも表層（比較的古い貝殻が存在していた堆積層の上）に新しい貝殻が堆積していることから、海洋投入土砂による堆積が生じた後、通常の堆積過程による土砂の堆積が生じたものと考えられる。Core4においては、年代測定

した貝殻からは、通常の堆積過程由来の新しい貝殻が検出されなかったことから、Core4の堆積物のほとんどは海洋投入土砂であると考えられる。

(2) 海洋投入土砂堆積後の土砂の移動・堆積履歴

Core2及びCore3に関しては、比較的明確に海洋投入土砂の堆積層と通常の堆積過程による堆積層を分けることができ、上述のように海洋投入土砂が堆積した後、新たに通常の堆積過程による堆積が生じたと考えられた。海洋投入土砂の堆積後に新たに堆積した量は、Core2に関しては表層約40cm、Core3に関しては表層約30cmと考えられる。通常、水深が深い領域の方が堆積速度は遅いことが多いけれども、本結果においては水深がより浅いCore3（水深12m）の方がCore2（水深15m）と比較して堆積量が少なかった。これは大型の低気圧の通過等に伴う高波浪による大規模な地形変化（例えば、武若ら、2009）によって、水深の浅いCore3がより大きく侵食を受けたためと考えられる。

(3) 粒径の異なる土砂の移動・堆積履歴

各海底コアにおいて中央粒径の鉛直分布（図-5）を比較すると、Core1及びCore4において特徴的な粒径の変化が見られた。このような鉛直方向の粒径の変化は土砂の由来や堆積過程が異なることを意味するものである。Core1及びCore4の表層における堆積物は比較的粒径が大きいことから、通常の堆積過程や海洋投入土砂の投入直後における直接的な堆積とは異なると推察される。

具体的にCore1に関しては、表層20cmは粒径0.15～0.2mm程度の砂で、それ以深においては粒径0.13mm程度の非常に細かい粒径で構成されていた。つまり、表層から12cm付近と30cm付近に海洋投入土砂由来の堆積物の影響が見られるものの、両者は一度に堆積が進行したのではなく、表層から30cm付近の層は土砂の海洋投入直後に堆積した層であり、表層から12cm付近の堆積層はその後、他の地点において侵食された土砂の再堆積によって形成されたものであると考えられる。すなわち、この再堆積が表層において、新しい貝殻と古い貝殻が混在した状態を形成したと推察される。さらに水深が深いため堆積速度が遅いことから、Core2やCore3のように表層において、その後の通常の堆積過程による堆積層を明確に分別できなかったと考えられる。

Core4に関しては、表層45cmは粒径1mm程度の粗粒分で構成され、それ以深においては粒径0.14mm程度の細粒分で構成されていた。すなわち、表層から45cm付近の上層と下層は同じ海洋投入土砂由来の堆積物であっても、堆積過程が異なると考えられる。Core4の採取地点は水深が比較的浅いため、波高の大きい時化の際には土砂は比較的容易に移動することから、海底面の急激な侵食や堆積が生じやすい。実際に、図-3に示す海底地形に

おいても、Core4の採取地点は等深線が凹んでおり、沿岸方向の地盤高と比較して地盤が低く、このような地形は高波浪等により侵食が生じたことで形成されたものではないかと考えられる。すなわち、Core4においては1965年以降に土砂の海洋投入に伴う堆積が生じた後、過去の低気圧の通過等によって現在の表層から45cmの面まで侵食を受け、侵食により周囲と比較して水深が深くなったことから再び堆積が生じやすい状態となり、表層45cmの粗粒分が急激に堆積したと推察される。

5. おわりに

本研究では、放射性炭素年代測定法により海底土砂中に含まれる貝殻の年代を測定することで、過去に海洋投入された土砂の堆積状況を評価し、海底土砂の移動・堆積履歴を推定した。本手法は各水深帯での土砂のおおよその移動・堆積履歴を推定できることが示され、その結果、海洋投入土砂は水深19m帯にも十分に到達し、堆積を生じさせたことが示された。また、堆積した海洋投入土砂は比較的水深が深い領域においては、あまり移動していない一方で、比較的水深の浅い領域における侵食により、一部の海洋投入土砂は移動し、他の地点において再堆積を生じさせていることが示された。

謝辞：本研究の一部は、JSPS科研費若手研究（B）「年代トレーサーを用いた海洋投入土砂の長期移動・堆積特性と地形変化への影響の推定」（課題番号：25820235）の助成による成果である。また、本研究の実施にあたり、現地調査、粒度分析において（独）港湾空港技術研究所、柳嶋慎一氏の多大な協力を受けるとともに、同氏から様々な助言を頂いた。ここに記し感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 井内美郎・斎藤文紀（1993）：海跡湖の地史-3 霞ヶ浦，URBAN KUBOTA, No.32, pp.56-63.
- 熊谷隆宏・中嶋さやか・琴浦毅（2009）：貝殻片混合砂の掃流移動特性に関する実験的研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.65, No.1, pp.531-535.
- 小松原純子・木村克己（2011）：埼玉県川越市下老袋地区から採取した荒川低地の沖積層ボーリングコア（GS-KSO-1）の堆積相と堆積環境，堆積学研究，Vol.70, No.2, pp.93-103.
- 佐藤昭二・田中則男・佐々木克博（1974）：鹿島港建設に伴う海底地形変化について，港研報告，Vol.13, No.4, 78p.
- 武若 聡・笹倉慎也・Elsayed GALAL・柳嶋慎一（2009）：2006年秋期低気圧による鹿島灘の侵食，土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp.277-284.
- Shishikura, M., T. Echigo, H. Kaneda (2007): Marine reservoir correction for the Pacific coast of central Japan using ^{14}C ages of marine mollusks uplifted during historical earthquakes, Quaternary Research, Vol.67, No.2, pp.286-291.
- Stuiver, M. and Polach, H.A. (1977): Discussion: Reporting of ^{14}C data, Radiocarbon, Vol.19, No.3, pp.355-363.