

Pilarczyk, JE, Sawai, Y, Matsumoto, D, Namegaya, Y, Nishida, N., Ikehara, K.,
Fujiwara, O, Gouramanis, C, Dura, T. and Horton B P., 2019. Constraining
sediment provenance for tsunami deposits using distributions of grain size
and foraminifera from the Kujukuri coastline and shelf, Japan. Sedimentology

日本の九十九里沿岸と陸棚からの粒度分布と有孔虫分布を用いた津波堆積物の堆積物
起源の制約

要旨

地質記録に保存された津波堆積物は、より長期に渡る津波の頻度と強度のパターンの
より包括的な理解を提供する。しかし、津波堆積物の認識は、堆積後の変化、堆積物
と周囲の堆積層との間のコントラストの欠如、そして津波堆積物と嵐の堆積物との区
別の困難を伴う。現世のベースライン研究は、古津波堆積物と比較できる現世の空間
分布への洞察を提供することで、これらの課題に対処する。本研究では、津波堆積物
の解釈への基礎を提供するために、蓮沼ビーチと九十九里の陸棚から粒度と有孔虫の
空間的痕跡を記録する。東京から約 50km 東の蓮沼海岸で、津波の識別のために、3 つ
の一般的な代替指標の空間分布(有孔虫の分類、タフォノミー、堆積物の粒径)をマッ
ピングするとともに、PAM クラスター分析を用いてクラスター化した。PAM クラスター
分析は、陸上と沖合の試料地点に対応する 2 つの沿岸域を客観的に識別した。結果は、
陸上試料はより粗い粒子サイズ(中粒砂～粗粒砂)と *Pararotalia nipponica* のより高
い存在量(27～63%)で特徴づけられ、沖合試料はより微細な粒子サイズ(細粒砂～中粒
砂)で、*Pararotalia nipponica*(2～19%)と *Ammonia parkinsoniana*(0～10%)のより
少ない存在量とより高い存在量の浮遊性有孔虫(15～58%)と *Uvigerinella glabra* を
含む脆い殻の有孔虫で特徴付けられる。粒径と有孔虫の種組成と比較すると、有孔虫
のタフォノミー、すなわち有孔虫の表面状態は津波堆積物の特定に一般的には使用さ

れていないのだが、現世の沿岸域(潮上帯, 潮間帯および沖合の環境の特定)の識別と
九十九里の津波堆積物の堆積物起源の決定に最も効果的であった。この現世のベース
ライン研究は、堆積物の起源を決定するための基礎を提供するので、地質学的記録に
おける津波堆積物の解釈を助ける。

序論

東日本の海岸線は、繰り返される大地震と津波の長い歴史を持つ(例えば, Nanayama
et al., 2003; Sawai et al., 2012)。北海道(Nanayama et al., 2003, 2007; Sawai
et al., 2004, 2009b) ; 東北(Sawai et al., 2012; Tanigawa et al., 2014)と関東
(Fujiwara & Kamataki, 2007; Shishikura, 2014)で行われた地質研究で歴史記録以
前の地震と津波の証拠が明らかになり、既知の事件の時間枠が4000年まで遡ることと
なった。これらの研究は、沈み込み帯沿いの長期的な地震の傾向を評価するために使
用されている(例えば, Sawai et al., 2012, 2015)。

オーバーウォッシュ堆積物の起源の評価には、例えば、日本では、運搬された堆積
物から運搬距離と深さの決定によってハザードアセスメントを改善できる(例えば,
Uchida et al., 2010; Kosciuch et al., 2018)。しかし、沿岸堆積物内に保存されて
いる異常な砂層の起源を評価することは、海成堆積物、汽水堆積物、および陸成堆積
物の混合物の存在や、海岸線を浸水する際の津波の侵食、移動、堆積によって複雑に
なる(例: Dawson et al., 1996; Grand Pre et al., 2012; Pilarczyk et al., 2014)。
堆積物プロキシの詳細な現在の分布の研究は、海岸、沿岸および沖合の環境内の堆積
物起源を特定するので、この点で役立つ(例えば, Gischler & Möder, 2009; Pilarczyk
et al., 2011; Kosciuch et al., 2018)。

地質記録における津波堆積物を特定するために開発された「代替指標ツール」には、
(i)堆積物の岩相と層序(例えば, Atwater, 1987; Pinegina et al., 2003; Cisternas
et al., 2005); (ii)微化石(例えば, Hemphill-Haley, 1995; Hawkes et al., 2007;

Dura et al., 2016); (iii) 粒径(例えば, Donato et al., 2009; Jaffe et al., 2011; Matsumoto et al., 2016); (iv) 地球化学(例えば, Minoura & Nakaya, 1991; Chagué-Goff et al., 2012; Shinozaki et al., 2015)などの海洋指標プロキシが含まれる。オーバーウォッシュ(すなわち, 津波と嵐による浸水)堆積物を解釈するための代替指標データの有用性は, 現世環境におけるそれらの空間分布の制約によって強化できる(Pilarczyk et al., 2011; Pham et al., 2017; Kosciuch et al., 2018)。このようなベースライン調査は, 地質記録に含まれる異常な砂層を解釈する根拠を提供する。

古津波を同定するために, 九十九里中央部の蓮沼海岸で, 有孔虫の種組成とタフオノミー(化石化過程; 個体の殻表面の状態)と堆積物の粒径の3つの代替指標の空間分布を調べ, マッピングした(図1)。オーバーウォッシュ堆積物を適切に評価するためには複数の代替指標によるアプローチが必要だが, 堆積物起源の評価にどの代替指標が最も有用かの決定は特に重要である。なぜならば, 2011年の東北津波で浸水した地域でも(Goto et al., 2012), 津波の再発と規模の長期的パターンはほとんど分かっていないためである。古津波の認識と堆積物起源を評価するための現世のベースライン研究の確立は, 首都圏周辺地域の沿岸堆積物に保存されている古津波堆積物の解釈に役立つだろう(Fujiwara & Kamataki, 2007)。

調査地点の説明

蓮沼海岸は日本の太平洋側, 東京の約50km東に位置する九十九里平野の一部である(図1A及びB)。九十九里平野は, 大陸プレート, 太平洋プレート, フィリピン海プレートとの間の収束境界の近傍で, 完新世にかけて構造的隆起がもたらされている(例えば Shishikura, 2000, 2001; Shishikura & Miyauchi, 2001; Tamura et al., 2010)。この構造的隆起は, 浸食性の岬からの堆積物の継続的な供給と相まって, 幅7~10kmで北東/南西方向で長さ約50kmの海側に広がっていく砂堤列平野システムの形成を可能にした(Shishikura, 2000)。一連の平行あるいはほぼ平行な砂質浜堤(TPから2~

10m の高さ ; TP =東京湾の平均海面)と砂質浜堤の谷は過去 6000 年間(Moriwaki, 1979; Masuda et al., 2001; Tamura et al., 2007)に海岸線が最大 10km まで前進したことを記録している(Sunamura & Horikawa, 1977).

九十九里の砂堤列平野の陸側末端は, 更新世の海成堆積物とローム(海洋同位体ステージ 5e)からなる海成段丘で規定され, その高さは標高 130m 上までに達している(Tamura et al., 2010). 海側末端は, 微潮汐(平均潮位が TP から 1.07 m)の海岸線に沿った一連の連続的な砂浜(幅約 100~200m)によって特徴付けられる. 沖合の陸棚は完新世の薄い砂層と露岩で特徴づけられ(Nishida et al., 2019), 沿岸地帯への主な堆積物の流入源は浸食されつつある岬(例えば, 屏風ヶ浦と太東埼沿岸の崖)で, 河川からの供給量は微量である(Uda, 1989).

沿岸環境は, 標高, 海岸線からの距離, 地形の特徴によって, おおまかに 4 つのゾーンに分けられる. (i) 200m の深さに達する緩傾斜で堆積物に枯渇した陸棚(九十九里棚); (ii) 高エネルギーの波が優勢な碎波帯; (iii) 前浜と後浜からなる緩やかに傾斜した海浜面(Tamura et al., 2008); (iv) 低木, 木や背の高い草によって特徴付けられた安定した砂丘システムへと移行するまばらな植生の砂丘(図 1C)である.

九十九里海岸の位置は, 外洋である太平洋, および日本海溝と相模トラフに面しており, 海岸線は津波(例えば, 2011 年東北津波; Matsumoto et al., 2016)や台風による浸水によって脆弱である. 九十九里海岸に影響を及ぼした様々な規模の顕著な沿岸洪水イベントとしては 1677 年(延宝津波), 1703 年(元禄津波)および 2011 年(東北津波)がある(Namegaya et al., 2011; Goto et al., 2012).

方法

試料収集と標高

粒度分析と有孔虫分析(種組成とタフオノミー)のために九十九里の中央部(図 1B, 2A, 3A)に位置する蓮沼海岸近くの 2 つの海岸に直交するトランセクト(T1 と T2)から, 合

計 50 個の表層堆積物試料(表層 1cm から 15cm³)を採取した。トランセクトは、砂丘(D), 後浜(BS), 前浜(FS), 砕波帯(S), および沖合帯(O)の環境にわたる全沿岸勾配を示す領域に配置した(図 1B と C)。2 つのトランセクト(T1 と T2)で、これらの各地形帯のそれぞれから堆積物を採取した。トランセクト T1 と T2 は海岸に直交するトランセクトで、それぞれ 28 個 (T1-1 から T1-28, 図 2)と 22 個の試料(T2-1 から T2-22, 図 3)を採取した(表 S1-S4)。

地形調査は、リアルタイムキネマティック全地球測位システム(RTK-GPS)GS10(Leica Geosystems Company Limited)を使用して仮想基準局(VRS)で行い、東京湾の平均間海面からの高度に調整した。この調査は、砂丘、後浜、前浜、砕波帯の環境内の各試料地点で実施し、一方、沖合試料の全地点の位置と深度はCrescent A100, VS110 GPS コンパス(Hemisphere GPS Inc., カルガリー, カナダ), Echo サウンダーのPDR-1300, PDR-130(Senbondenki Company Limited, 東京都), JFE 380(Japan Radio Company Limited, 東京都, 日本)を使って測定した。

沖合の試料は九十九里沖の陸棚全体に広がり、2014 年と 2015 年には、ボートから配備された Smith-McIntyre grab sampler(表層堆積物の上部 0~5cm)を使用して採取した。砂丘、後浜、前浜と砕波帯の試料は、2013 年に採取した。今後の研究で古記録との比較に使用できる詳細な現世分布を確立する目的で、オーバーウォッシュ堆積物の供給源のありそうな沿岸トランセクトを選んだ。それぞれの環境からの堆積物試料(表層 1cm から 15cm³)は、粒度分析と有孔虫分析(種組成とタフォノミー)に関して記述した。次に、粒度と有孔虫のデータを、PAM クラスタ分析を使用してクラスタ化し、生物相、タフォノミー相、岩相及びそれらを組み合わせ相に識別した。

粒度分析

粒度分析にはCamsizer (Retsch Technology GmbH, Haan, ドイツ, 測定粒径 1.6~3200 μ m)を用いて 50 個の表層試料について行った。Camsizer の分析前に、30%過酸化

水素と 10%塩酸を用いて有機物と炭酸塩を除去し、50°Cで 72 時間乾燥した(Matsumoto et al., 2016). 粒径値を Wentworth-Phi Scale に変換する前に、3 回の反復実験の平均を求めた(Krumbein, 1934). 各トランセクトの粒径値と存在量は、Sambridge et al. (1995)による Triangular Irregular Network (TIN) アルゴリズムを使用して内挿とグリッド化を行い、Geosoft Oasis TM(図 2B, 3B および Donato et al., 2009)に粒度分布図としてプロットした. 粒子サイズの記載はBlott & Pye(2001)に従った. 統計パラメーターは平均値(平均粒径), 最頻値(卓越粒径), 標準偏差(分級度), 歪度(粒度分布の対称度), 尖度(粒度分布のピーク度), d10, d50, d90(試料の体積の 10%, 50%, 90% がより小さい粒子によって占められる粒径)を用いて各試料を特徴付け, それらを表 S1 と S2 に列挙した.

有孔虫分析

有孔虫分析のための 33 個の表層堆積物試料を Rose Bengal で染色し, 採取直後に緩衝化エタノール中に保存して, 生体個体と死亡個体を同定した(図 2C および 3C; Walton, 1952 ; Murray & Bowser, 2000). 全群集のみを考慮した場所では, 追加の 17 個の未染色表面堆積物試料を使用した. 分析前に 10cm³の堆積物試料を 63 μ m のふるいで洗浄し, 試料を湿式分割して約 300 個の標本を得た(Scott & Hermelin, 1993). 10cm³以内に含まれる有孔虫の総数(生体個体と死亡個体)を各試料部位について計算した(図 2C と 3C; 表 S3 と S4). 有孔虫の分類は, Loeblich & Tappan (1987)および Uchida et al. (2010)に従い, ワシントン DC にあるスミソニアン協会のタイプ標本を用いて識別を確認した. 図 4 は, Hitachi TM3030 卓上顕微鏡(日立ハイテク, 福岡, 日本)で撮影した本研究で同定した主な有孔虫の分類群の走査型電子顕微鏡(SEM)画像である.

有孔虫は, Pilarczyk et al. (2011)によって定義されたものと同じタフォノミーの基準で分類し, それらには, 未変質個体, 断片化された個体, 腐食した個体(腐食と摩

耗の複合的影響)を含む。壊れた個所が角張った個体を断片化と分類し、壊れた個所が丸まった個体を腐食と分類した。個々の有孔虫のタフォノミック(または表面)状態は、以前はオーバーウォッシュ堆積物の解釈に使用されてきた(例えば, Goff et al., 2011; Pilarczyk et al., 2012; Hoffmann et al., 2018)。なぜならば、それが堆積物起源と運搬履歴の指標であるからだ。両方のトランセクトについて、標高または深さ(TP からの高さ m)、10cm³の総有孔虫数、死んだ(染色されていない)個体の存在量(利用可能な場合)、優占種とタフォノミクス特性を海岸線からの距離の増加に対してプロットした(図2および3)。有孔虫の結果を表S3とS4に列挙する。

クラスター分析

PAM クラスター分析を使用して、生物相、タフォノミー相、岩相および組み合わせ相を客観的に決定した後、トランセクト T1 と T2 に沿って観察された沿岸帯の地形と比較した。クラスター分析の前に種組成、タフォノミック的な値、粒度の値を以下のように標準化した。まず、生の数値(種組成データとタフォノミックデータ)と測定値(粒径データ)を占有率に変換し、次に Z スコアを計算してクラスター化に使った。Z スコアは、平均からの標準偏差を評価することによってデータセットを標準化する手段である(Davis & Sampson, 2002)。PAM クラスター分析(Kaufman & Rousseeuw, 1990)は Kemp et al. (2012)の方法に従って行い、有孔虫の種組成(総群集)、タフォノミー、粒径データセットの組み合わせに基づいて九十九里沿岸のトランセクト内の帯状分布を識別するために R の「cluster」パッケージ(Maechler et al., 2005)を用いた。

Partitioning Around Medoids(PAM)は、幅が-1 から 1 までの範囲でシルエットプロットを作る。シルエットは試料の分類の推定値で、-1 に近い値は誤って分類された値で、1 に近い値は、試料が適切なクラスターに割り当てられたことを示す。最大平均シルエット幅は、この研究の各データセットの組み合わせ内のクラスター数を客観的に判断するために使用した(例えば、テスト 1~7, 下記参照)。シルエット幅を決定する

方法は, Kaufman & Rousseeuw (1990) に詳述されている.

どのデータセットが最も効果的にクラスター化されているかを判断するために, 占有率を使用して 7 つのデータの組み合わせ: テスト 1 (種組成), テスト 2 (タフォノミー), テスト 3 (粒径), テスト 4 (種組成とタフォノミー), テスト 5 (種組成とタフォノミーと粒度), テスト 6 (種組成と粒径), テスト 7 (タフォノミーと粒径) をクラスター化した. 蓮沼海岸での空間的違いを決定するために, T1 (図 S1 から S3) と T2 (図 S4 から S6) で別々にこれらのテストを行い, データセットを組み合わせ (T1 と T2, 図 5 と S7 から S10) この地域的違いを決定した.

結果

粒径

トランセクト 1 (T1)

平均粒径

トランセクト T1 は, 蓮沼海岸の海岸砂丘 (TP からの高さ 3.4 m) から九十九里の陸棚の海側の端 (TP からの高さ -123m) までの距離は 47 km である. このトランセクトに沿った平均粒径は, 細粒砂から粗粒砂の範囲であり, 2 つ (T1-15 と T1-28) を除く全ての試料が細粒砂から中粒砂の範囲だった (図 2B; 表 S1). 一般に, 平均粒径は深さとともに細くなり, 砂丘からの堆積物 (平均粒径 1.98 Φ), 後浜 (平均粒径 1.94 Φ) そして前浜 (平均粒径 1.92 Φ) は沖合からのもの (平均粒径 2.50 Φ) よりもわずかに粗かった. この海側に向かって細粒になる傾向の唯一の例外は砕波帯で, 平均粒径は 1.45 Φ だった. 沖合帯内では, 海岸線から 23km までは距離が増すとともに堆積物は徐々に細くなり (例えば, T1-16 では 2.70 Φ , T1-22 では 2.97 Φ), そこからは徐々に粗くなった (例えば, T1-23 で 2.81 Φ に対して T1-28 で 0.155 Φ).

最頻値

平均最頻値, または一定の分布内の卓越する粒径は, 砕波帯から内陸への距離が増すにつれて細かくなった(例えば, 砂丘試料における平均最頻 2.05Φ に対して, 砕波帯の平均最頻 1.76Φ). 一般に, 最も細かい最頻値は沖合の試料で見られ, 海岸線から 23km までは徐々に細かくなり(例えば, T1-16 では 2.62Φ に対して, T1-22 では 3.12Φ) そのさきでは徐々に粗くなった(T1-23 で 2.88Φ に対して T1-28 で 1.12Φ).

分級度

2つの最も粗い試料, T1-15 と T1-28 は分級されていないが(それぞれ 1.08Φ と 1.25Φ), T1 沿いの堆積物は良く分級されていた(0.81Φ から 0.32Φ ; 表 S1). 一般に, 分級度は, 砂丘(中程度の良い分級; 平均 $SD=0.60\Phi$)から沖合(良い分級; 平均 $SD=0.45\Phi$)に向かって増加した. ただし, 砕波帯は平均程度 0.80Φ (中程度の分級)で最も分級されていない.

歪度と尖度

一般に, T1 からのほとんどの試料は, 対称的な粒度分布とメソクルト性尖度(正規分布を持つ堆積物特性曲線)を持つ. 粗粒側に歪んだ(粗い粒子が優勢な堆積物特性曲線)試料は一般に沖合帯に限定され, 前浜の T1-11 と後浜の T1-4 も粗粒側に歪む(それぞれ -0.11Φ と -0.12Φ). 唯一, 細粒側に歪んだ(細かい粒子が優勢な堆積物特性曲線)試料は, 砕波帯から採取された T1-15 (0.10Φ)である. Platykurtic(平均付近で広がり裾野が狭い堆積物特性曲線)の試料は, 前浜と砕波帯に限られており, 堆積物は一般的に最も粗く(平均粒径= $1.80\sim 1.57\Phi$)かつ分級されていない(平均 $SD=0.81\sim 0.65\Phi$). このパターンの1つの例外は T1-28 で, 0.81Φ の Platykurtic 尖度を持つあまり分級されていない粗粒砂である. これとは対照的に, leptokurtic 尖度(より平均付近で尖り, 裾野が厚い堆積物特性曲線)の試料は沖合帯でしか見られず, 採取された 13 試料のうち 7 つで見られた.

226

227 トランセクト 2 (T2)

228 平均粒径

229 トランセクト T2 は蓮沼海岸の沿岸砂丘 (TP からの高さ 3.6m) から九十九里の陸棚の海
230 側の端 (TP からの高さ 124m) まで 41km である. このトランセクトに沿った平均粒径は,
231 細粒砂から粗粒砂の範囲であり 1 試料 (T2-21) を除く全ての試料が細粒砂から中粒砂
232 の範囲だった (図 2B; 表 S2). T1 と同様に, T2 に沿った平均粒径は深さとともに細か
233 くなる. 砂丘の堆積物 (平均粒径 1.96Φ), 後浜の堆積物 (平均粒径 1.76Φ), 前浜の堆
234 積物 (平均粒径 1.89Φ) は沖合の堆積物 (平均粒径 2.32Φ) よりもわずかに粗かった. 最
235 も粗い試料は砕波帯のもので, 平均粒径は 1.34Φ だった. 沖合帯内では, 堆積物は一
236 般的に 40km の距離まで細粒砂の範囲内 ($2.80\sim 1.95\Phi$) にあり, その地点からは粗くな
237 った (例えば, T2-20 で 2.63Φ に対して T2-21 で 0.87Φ).

238

239 最頻値

240 T2 に沿った優勢な粒径は, T1 ほどには海側方向への距離の増加に伴った細粒化傾向を
241 示さなかった. 最も粗い最頻値は砕波帯 (平均最頻= 1.15Φ) で見られたが, 前浜試料 (平
242 均最頻= 2.05Φ) は砂丘試料 (平均最頻= 1.96Φ) よりも一般的に細かかった. T1 と同様
243 に, 最も細かい最頻値は沖合の 34km の距離までの試料 ($2.87\sim 2.37\Phi$) に見られ, その
244 地点からは徐々に粗くなった (T2-20 では 2.37Φ に対して T2-22 で 1.62Φ).

245

246 分級度

247 T2 からの分級が最も低い試料は, 九十九里の陸棚の端の T2-21 (1.48Φ) と T2-
248 22 (1.13Φ) だった. T1 と同様に, 他の全試料は中程度に良く分級されていた (0.85Φ
249 $\sim 0.35\Phi$; 表 S2). 一般に, 分級度は砂丘 (中程度に良く分級された; 平均 SD= 0.58Φ),
250 後浜 (中程度に良く分級された; 平均 SD= 0.62Φ), 前浜 (中程度に良く分級された; 平均

SD=0.59Φ)と沖合(中程度に良く分級された;平均 SD=0.63Φ)で, 砕波帯(中程度に分
類された;平均 SD=0.74Φ)が最も分級されていないゾーンだった.

歪度と尖度

一般に, T1 と同様に, T2 からのほとんどの試料は, 対称的な粒径分布とメソクルト性
尖度を持つ. 歪度が非常に粗いから粗い堆積物は, 前浜と沖合の地帯に限られていた.
粒度分布がわずかに歪んだ試料は T2-10 から T2-12 の砕波帯で見られ(それぞれ
0.26Φ, 0.26Φ と 0.25Φ), 後浜に異常に歪度の低い試料が 1 つあった(T2-4 で 0.10Φ).
T2-15 もまた Platykurtic 性尖度(0.77Φ)を持つが, 一般的には Platykurtic 性試料
は砕波帯(例えば T2-12, T2-11, T2-9)でしか見られなかった. Leptokurtic 性尖度を
持つ試料は, このタイプの尖度を含む沖合帯でしか見つからず, 採取された 10 試料の
うちの 7 つで見られた.

有孔虫

トランセクト 1 (T1)

有孔虫は T1 から採取した全試料に存在する(図 2 ; 表 S3). 砂丘から沖合に移動する
と, 有孔虫の総濃度は 10cm³ 当たり 10~9952 個体だった. 有孔虫の濃度は沖合帯(10cm³
当たり 320~9952 個体)でピークに達し, 砕波帯(10cm³ 当たり 382~956 個体), 前浜
(10cm³ 当たり 68~240 個体), 後浜(10cm³ 当たり 74~86 個体), 砂丘(10cm³ 当たり 10
~42 個体)だった.

T1 試料中に合計 23 種もの有孔虫が存在した. 沖合帯は浮遊性種が多く(17~48%),
砕波帯は *Pararotalia nipponica* (28~33%), *Ammonia parkinsoniana* (22~27%),
Elphidium crispum (7~11%), 前浜は *P. nipponica* (27~35%), *A. parkinsoniana*
(15~30%) と *Anomaliniidae* sp. (4~15%), 後浜は *P. nipponica* (27~47%), *A.*
parkinsoniana (12~23%) および *Cibicides refulgens* (3~19%), 砂丘は *P.*

276 *nipponica* (35~53%), *A. parkinsoniana* (13~23%)が多い。浮遊性有孔虫種はT1
277 では全般的に中程度の量(0~48%)で存在するが、一般的には内陸約 40m までの距離の
278 堆積物にしか見られなかった。

279 T1 からの堆積物に含まれる有孔虫のタフォノミック状態は、断片化、腐食化、未変
280 質の形態を含む。砕波帯内の試料は、未変質の個体が独占的に占め(44~52%)、一方、
281 前浜、後浜、砂丘内の試料は一般的に腐食した個体が大半を占める(それぞれ 27~51%,
282 58~82%, 81~93%)。対照的に、沖合の試料は未変質の個体が優勢だった(65~88%)。

283

284 トランセクト 2 (T2)

285 T2 堆積物中の有孔虫濃度は、T1 で観察されたものと同様である(図 3 ; 表 S4)。有孔虫
286 濃度は沖合帯で最も高く(10cm³ 当たり 256~17216 個体)、次に砕波帯(10cm³ 当たり 358
287 ~594 個体)、前浜(10cm³ 当たり 34~668 個体)、後浜(10cm³ 当たり 16~82 個体)、砂丘
288 (10cm³ 当たり 22~38 個体)であった。

289 T2 における群集の卓越種は、T1 群集と比較した場合、わずかな違いを示した。沖合
290 帯は浮遊性が多く(15~58%)、砕波帯は *P. nipponica* (38~48%), *E. crispum* (5~
291 8%), および浮遊性種(6~9%)、前浜は *P. nipponica* (34~44%), *A. parkinsoniana*
292 (12~24%), *C. refluens* (7~18%)、後浜(BS)と砂丘(D)では *P. nipponica* (BS=37
293 ~50% ; D=54~63%), *A. parkinsoniana* (BS=12~43% ; D=10~45%)だった。浮
294 遊性種は内陸に 70m の距離まで存在する(4~58%)。

295 T1 と同様に、沖合(O)と砕波帯(S)は未変質の個体が多いことで特徴づけられ(O=45
296 ~86%, S=39~49%)、前浜、後浜、砂丘では腐食した個体が多かった(それぞれ 27~
297 60%, 71~87%, 82~84%)。

298

299 クラスタ分析：生物相、タフォノミー相、岩相

300 蓮沼海岸でのプロキシデータ内の空間変動を調べるため、最初に T1(図 S1~S3)と

T2(図 S4～S6)のデータセットを検討した。データセット(T1+T2)を組み合わせて、沿岸域を識別できるかテストした(図 S7～S10)。T1 対 T2 の場合、最も高い平均シルエット幅を生成したテストは同じ方法で順序付けられ(表 1)、テスト 2(タフォノミー; $T1=0.56$, $T2=0.48$; 図 S1 の B1 と S4 の bi)とテスト 3(粒径; $T1=0.41$, $T2=0.40$; 図 S1 の CI と S4 の CI)が最大の幅を生み、そしてテスト 1(種組成; $T1=0.16$, $T2=0.12$, 図 S1 の ai 及び S4 の ai)が最小幅を生み出した。T1 と T2 のそれぞれについての 7 つテスト全てが、データが確実に 2 から 3 のクラスターに分割できることを示す。T2 に関しては、テスト 1 が、5 クラスターのシナリオで最も高い平均シルエット幅(0.14)を生成したが、クラスターの 1 つが 0 の値を返したため、これは単一の試料で構成されていることを示す(図 S4av)。これは、4 クラスターシナリオのうち 1 つについて 0 の値を返した T2 のテスト 3 と似る(図 S4civ)。

T1 と T2 データセットをまとめて考慮した場合、PAM は 3 つのクラスター(潮上帯、潮間帯、沖合のクラスター)を示したテスト 2 を除き、7 つのテストのそれぞれに関して 2 つのクラスター(陸上、沖合)を示した(図 4)。最高～最低のシルエット幅に順序をつけて並べた場合、T1+T2 データセット(表 1)はテスト 2(タフォノミー; $T1+T2=0.53$)とテスト 3(粒径; $T1+T2=0.40$)が最も高いシルエット幅を生成し、テスト 1(種組成; $T1+T2=0.13$)が最も低いシルエット幅を生成した。プロキシデータセットを組み合わせたクラスター分析では、一般に個々のデータセットから得たシルエット幅よりも狭いシルエット幅が得られ、テスト 7(平均シルエット幅=0.39)、テスト 6(平均シルエット幅=0.26)、テスト 5(平均シルエット幅=0.26)、テスト 4(平均シルエット幅=0.18)だった。

7 つのテストのうち 6 つで、最高平均シルエット幅が 3 クラスターシナリオが出た(テスト 4 を除く全てのテスト)。ただし、クラスターが生態学的に意味をなしたのはテスト 2(タフォノミー)の場合のみである(平均シルエット幅=0.46; 試料の 94%が適切なグループにクラスター化された)。タフォノミーは種組成データを強化した。例え

ば, 2 クラスターのシナリオでは, 種組成の平均シルエット幅は 0.13 で, 試料の 90% が適切なグループに分類されたが, 種組成とタフォノミーの平均シルエット幅は 0.18 で 98%の試料が適切にクラスター化された. タフォノミーは粒度データを改善せず, クラスター化された試料の精度は同じ(90%)ままで, 平均シルエット幅は 0.01 しか変化しなかった(表 1). 3 つのパラメータの全てを一緒に追加しても, 種組成の場合を除いて, 適切にクラスター化された試料と平均シルエット幅の精度はそれほど向上しなかった.

組み合わせたデータセット(T1+T2)におけるクラスター分析に続いて, PAM で定義したクラスターを用いて, 生物相(テスト 1, 種組成), タフォノミー相(テスト 2, タフォノミー)および岩相(テスト 3, 粒径), ならびにデータセットのさまざまな組み合わせから生じる相を記述した(C4, C5, C6, C7, 図 5).

生物相(テスト 1)

グループ BF-1(陸上グループ)の平均シルエット幅は 0.16 で, *Pararotalia nipponica* が卓越する(9~63%). このクラスターの標高は TP より-34m~4m で, 海岸線からの距離は-18, 460m~120m である. グループ BF-2(沖合グループ)の平均シルエットは 0.08 である. BF-2 の試料の標高は TP より-124m~1.0m で, 海岸線からの距離は-46, 600m~49m である. BF-2 の有孔虫群集は, *Uvigerinella glabra*, *Buccella frigida*, *A. tepida* などを含み, 脆弱な殻の種が少ないことを特徴とする.

Taphofacies(テスト 2)

グループ TF-1(潮間帯グループ)は, シルエットの平均幅が 0.61 であり, TP より高さ -0.5m~1.0m, 海岸線からの距離が 0m~49m であることで特徴づけられる. TF-1 のタフォノミック群集は, 未変質の有孔虫(12~52%), 次いで断片化した有孔虫(25~44%), 腐食化した有孔虫(20~44%)となる. TF-2 群(潮上帯)の平均シルエット幅は 0.53, TP

からの高さが 0.7m~3.6m, 海岸線からの距離は 40m~120m だった. TF-1 とは異なり, TF-2 は腐食化した個体(53~93%)が多く, 断片化された個体(7~32%)と未変質の個体(0~29%)が続く. グループ TF-3(沖合グループ)は, 平均シルエット幅が 0.72, TP からの高さが-125m~-13m, 海岸線からの距離が-3080m~-46,600m であることで特徴づけられる. TF-3 は浮遊性の種(15~58%)および未変質の個体(64~88%)が優勢である.

岩相(テスト 3)

グループ LF-1(陸上グループ)の平均シルエット幅は 0.31 で, TP からの高さが-124m~-4m, 海岸線からの距離は-46,600m~123m である. LF-1 に含まれる試料の平均粒径は 0.15~2.15 Φ (粗砂から中粒砂)で, 細粒砂が主である(d_{90} =1.61~2.95 Φ). グループ LF-2(沖合グループ;平均シルエット幅=0.58)は, やや細粒砂(平均=2.57~2.97 Φ , d_{90} =3.05~3.40 Φ)試料が優勢だが, それでもまだ中粒砂の範囲である. LF-2 からの試料は, TP からの高さが-87m~-13m の範囲で, 海岸線からの距離が-3080m~-33,640m であることで特徴づけられる(誤ってクラスター化した T1-12 を除く).

組み合わせ相(テスト 4~7)

ここに記された組み合わせ相は, テスト 4(C4-1~C4-3), テスト 5(C5-1, C5-2), テスト 6(C6-1, C6-2), テスト 7(C7-1, C7-2;図 5, S8~S10)の組み合わせであり, 平均シルエット幅が最高から最小の順に以下で説明する.

C7-1 内の試料の地点は, TP からの高さが-124m~4m で, 海岸線からの距離が 123m~-46,600m である. 未変質個体が, このクラスターからの試料の 45%においてタフォノミック群集を支配している. C7-1 クラスターは一般的に中粒砂の範囲(平均粒度=1.68 Φ)にあるが 0.15 Φ (粗粒砂)から 2.15 Φ (細粒砂)の範囲にある堆積物によって特徴付けられる. このクラスター内の試料の d_{90} は, 中粒砂の範囲(1.61~2.95 Φ)内

では比較的一定である。しかし、d10 は非常に細かい小礫(-1.37Φ)と中粒砂(1.56Φ)の間で変動する。C7-2 クラスターには、一般に C7-1 と比較して、標高が低く (TP からの高さが-13m~-87m)、海岸線からの距離が遠い(-33,640m~-3808m)試料を含む。C7-2 の堆積物の粒径は、C7-1 よりわずかに細かく (平均粒径=2.75Φ, 細粒砂), 2.57~2.97Φ (細粒砂)の範囲だった。d10 は中~細粒砂(1.92~2.53Φ)を超えず, d90 は極細粒砂(3.05~3.40Φ)よりも細かい領域に入っていない。

C6-1 クラスターは、海岸線から 123~-466,00m, TP からの高さが-124m~4m の採取地点からなる。C6-1 試料は一般に *P. nipponica* (2~63%), そしてほとんどの場合は *A. parkinsoniana* (1~45%)が優勢で, *C. refulgens* と *E. crispum*は少なかった(<23%)。平均粒径は、粗粒砂(0.15Φ)から細粒砂(2.15Φ)までの範囲にあり、平均粒径は 1.68Φ (中粒砂)である。d90 値は主に細粒砂の範囲内だが、d10 値は中粒砂(1.92Φ)と細粒砂(2.53Φ)の間で変動する。クラスターC6-2 は、一般的に深く (TP からの高さが-13~-87m)、さらに海岸線から離れた(-3080~-31140m)沖合の試料からなる。これらの試料では、浮遊性種(15~58%)が有孔虫群集を支配している。C6-2 試料は、C6-1 でクラスター化された試料よりも細かく、平均粒径は 2.57~2.97Φ の細粒砂の範囲である。

3つのデータセットの全てをクラスター化するテスト5では、標高と海岸線からの距離によって区別できる2つのクラスターを定義した。クラスターC5-1 は、沖合試料 T1-27, T1-28 および T2-21, T2-22 を除いて、海岸線から 123m 以内で、TP からの高さが-0.5m~4.0m にある試料で構成されている。C5-1 試料内の優占種は *P. nipponica* (3~63%), *A. parkinsoniana* (1~45%), *E. crispum* (最大 11%)で、ほとんどの有孔虫は腐食化した個体(12~93%)または未変質個体(0~81%)に分類される。平均粒径は、粗粒砂(0.15Φ)から細粒砂(2.15Φ)までの範囲にあり、平均粒径の平均は 1.64Φ (中砂)である。d90 値は全て細粒砂の範囲内(1.61~2.76Φ)だが、d10 値は極細粒の小礫(-1.67Φ)と中粒砂(1.56Φ)の間で変動する。C5-2 試料は C5-1 クラスター内の試料に

比ベ一般的に標高が低く (TP からの高さ-13m~-87m), 海岸線から遠い(-3080~-33,640m). *Pararotalia nipponica* と浮遊性種がそれぞれ 3~19%と 15~58%の範囲で優占する. C5-2 にクラスター化された全ての試料は, 未変質の個体が優位を占める (64~88%) タフォノミック群集を含む. C5-2 の堆積物の粒径は, C5-1 のものよりわずかに細かく, 平均粒径は中粒砂(1.95Φ)から細粒砂(2.97Φ)までで, 平均粒径の平均は 2.71Φ (細粒砂)である. T2-15 を除いて, d10 は中~細粒砂(1.92~2.53Φ)の範囲よりも粗い領域に入らないし, d90 も極細粒砂(3.05~3.40Φ) の範囲よりも細かい領域に入らない.

テスト 4 では, 潮間帯(C4-1), 潮上帯(C4-2), 沖合(C4-3)の試料を区別した. クラスタ C4-1 は, 主に(1つの沖合試料 T1-18 を除く), 海岸線から 118m 以内にある碎波帯試料と前浜試料(標高範囲=TP からの高さが-0.5m~4.0m)からなる. このクラスターは, *P. nipponica* (27~63%), *A. parkinsoniana* (4~30%), *E. crispum* (0~11%) の多産によって主に定義され, 未変質個体(36~52%)が優勢である. クラスタ C4-2 は, 海岸線のさらに内側(34~123m)で標高がより高い(TP からの高さが 0.6m~4m)試料から構成される. C4-2 クラスタは, 腐食化した個体(44~93%)の豊産で定義される. C4-1 と同様に, C4-2 試料は *P. nipponica* (27~54%)と *A. parkinsoniana* (12~45%) が優勢である. クラスタ C4-3 は, 沖合から採取された試料で構成され, 海岸線から -3080~-46,600m の距離で, TP からの高さが-13m~-129m である. クラスタ C4-3 は, 浮遊性種(15~58%)と未変質個体(45~88%)が大部分を占める.

考察

現世の代替指標分布

粒径の結果は, 2 つトランセクトに沿って陸上と海洋の試料に区別される (図 5). 一般に, T1 と T2 に沿った平均粒度は細粒砂から粗粒砂まで変化し, 深度が増すにつれて

徐々に細粒になり(図2), これは以前に九十九里の陸棚(Nishida et al., 2019)や他の場所(例: Gao & Collins, 1994)でも報告された傾向である。沖合約23kmの距離では, おそらく黒潮との相互作用が原因で, 平均粒径は粗くなった(Mizuno & White, 1983)。陸上の試料は中程度に良く分級されており, これは, 砂丘では風によって運ばれた堆積物が堆積し, また, 波と潮流によって分級されたためと予想される(Jiang et al., 2015)。同様に, 沖合の試料は一般的に, これらの深さでの堆積物は懸濁物から沈降したより細粒な堆積物なので, 非常に良く分級されている。

有孔虫の種組成は, 海洋の分類群が陸上には通常は産出しないという根拠に基づいて, 暴風雨と津波の両方の堆積物を評価する手段としてしばしば使用される(例えば Mamo et al., 2009; Hawkes & Horton, 2012; Pilarczyk et al., 2014)。研究はまた, オーバーウォッシュ堆積物に含まれる堆積物の起源を推定するために有孔虫を使う(Nanayama & Shigeno, 2006; Lane et al., 2011; Hawkes & Horton, 2012; Sieh et al., 2015)。沿岸と沖合環境における有孔虫の分布について多数の研究が報告されているが(例えば, Hayward, 1999; Berkeley et al., 2007), 調査地域のそれぞれの特徴を確立することが必要である(Kosciuch et al., 2018)。九十九里での現世堆積物試料の結果は, 新しい現世データセットを提供し, 津波堆積物の堆積物起源の制約に有用である。なぜならば, 種組成データが沖合起源の堆積物と陸上(onshore)起源の堆積物を示す2つの異なる生物相(BF-1 と BF-2)に分類されるためである。

九十九里の陸棚に沿って, 有孔虫群集は海岸線からの距離とともに変化した(図2と3)。例えば, 浮遊性有孔虫は砕波帯および前浜の環境(T1 では0~9%, T2 では4~12%)ではほとんど産出せず, 海岸線から30kmを超える距離の沖合帯でピーク(T2 では17~48%, T2 では15~58%)に達する。浮遊性種は砂丘試料全てから産出しない。浮遊性種の産出は, 以前にはオーバーウォッシュ堆積物の記述に使用されてきた(Davies et al., 2003; Hawkes et al., 2007; Uchida et al., 2010)。だが, それらが沿岸堆積物中に堆積する程度と, それらが津波や高潮によって洗い流される程度を評価する

のは困難である。九十九里の海浜と砂丘の堆積物は、浮遊性有孔虫をあまり含まず、
それゆえ、オーバーウォッシュ堆積物内のより高い存在量は、海岸線から数十 km の沖
合堆積物からの寄与を示す。

浮遊性種と同様に、潮間帯環境で普通に見られる有孔虫 *Ammonia parkinsoniana*
(Hayward et al., 2004) は、潮上帯(T1 では 12~23%)と潮間帯(T1 では 15~30%)の
試料でも多産するが、沖合の試料ではそれほど多くなかった(T1 では 0~4%)。これ
は、汽水性の潮間帯と潮下帯上部の堆積物中の *Ammonia* 属の産出を報告した Hayward
& Hollis(1994)の発見と一致している。*A. parkinsoniana* のような殻が丈夫な有孔虫
は、波のエネルギーが最も高い潮間帯でピークに達するが、殻が薄く脆弱な種は沖合
でより多い。たとえば、*Uvigerinella glabra* は一般的に、沖合の 6.6km(深さ=TP か
らの高さ-22m)の距離までには産出しなかった。これは Pilarczyk et al. (2011)によ
る研究、すなわち壊れやすい *Ammonia tepida* はラグーン内の外洋から庇護された低エ
ネルギーの地域に限定され、より丈夫な *Ammonia parkinsoniana* と *Ammonia convexa*
は、より高いエネルギーの砕波帯において多産する、と一致している。

有孔虫のタフォノミック特性は、海岸線からの距離に応じて予想どおりに変わった。
砕波帯内およびそれより深い場所の石灰質有孔虫は、空気にさらされることから保護
され、全試料で未変質個体の割合が最も高い(例えば、T2 の砕波帯堆積物では約 45%、
砂丘堆積物では 0%)。前浜、後浜、砂丘環境での滞留時間の増加は、有孔虫の殻の腐
食と摩耗を促進する。例えば、T1 に沿って、海岸線からの距離が増加するにつれて砕
波帯で 22%、前浜で 41%、後浜で 68%、砂丘で 89%と腐食化した個体の平均割合は
増加した(図 2)。これらの発見は、潮間帯や潮上堆積物と比較して、潮下帯環境内での
タフォノミックに未変質の有孔虫がより多いことを報告した Pilarczyk et al.
(2011)と Kosciuch et al. (2018)に一致する。

有孔虫の断片化は、両方のトランセクトにおいて内陸への距離の増加と共に産出量
はわずかに増加しただけだった(図 2 と 3)。いくつかの研究は、断片化した有孔虫の

産出頻度が津波堆積物内で増加することを報告している(例えば, Kortekaas & Dawson, 2007; Chagué-Goff et al., 2011). これは, 津波堆積物内での断片化は, もともとの堆積環境を反映しているのではなく, 津波による擦り重ねの結果である可能性を示唆する.

微化石タフォノミーは, オーバーウォッシュの代替指標の研究(Mamo et al., 2009; Pilarczyk et al., 2014)で十分に活用されていないが, 内陸への距離の増加との最大の関係を示し(図 2 及び 3), 最高の平均シルエット幅を持つクラスターシナリオをもたらしした. タフォノミックデータセットを含むテストは, 沖合, 潮間帯, 潮上帯の分離が可能な唯一の例であった(試験 2 および 4, 図 5). これは Kosciuch et al. (2018)に類似し, 彼らは熱帯のサンゴ礁環境において, タフォノミックデータセットが種組成データセットの有用性を高めたと報告している. Goodman-Tchernov et al. (2016)と Hoffmann et al. (2018)の研究では考古学的・堆積学的に組み合わせた個々の有孔虫のタフォノミクス特性のサブセットと堆積学的証拠を古津波堆積物の記述に用いた. Usami et al. (2017)は, 2011 年の東北地方津波によって発生した乱泥流による堆積物輸送を評価するために, 殻の薄い(もろい)種から保存状態の良い個体の産出を使用した. まとめると, これらの研究は有孔虫のタフォノミーの力を強調するが, タフォノミーを独立した手法として使用すべきでないことは重要である. むしろ, タフォノミーは, 解釈を強化し, 生態学的な文脈を提供できる種組成などの他の代替指標と組み合わせる使用するのが最善である.

現世のベースライン研究と堆積物の起源

堆積物の起源の評価は, オーバーウォッシュ堆積物の適切な解釈に不可欠で, 次の場合に特に重要である: (i) オーバーウォッシュ堆積物とその上下層の組成が類似している場合に, オーバーウォッシュ堆積物を識別すること(例: Pilarczyk et al., 2011; Kelsey et al., 2015; Kosciuch et al., 2018); (ii) イベントの規模を評価しようと

試みること (Uchida et al., 2010; Sieh et al., 2015); (iii)異なる種類のイベントを識別すること (例えば, 暴風雨と津波 ; Donato et al., 2008; Switzer & Jones, 2008). 堆積学的・微古生物学的代替指標は堆積物の起源を評価し, 津波堆積物を解釈するために以前から使用されてきた (Hemphill-Haley, 1995; Hawkes et al., 2007; Sawai et al., 2009a,b; Chague-Goff et al., 2011) が, どの代替指標が堆積物の起源の制約に最も効果的かを決定する定量的な方法はめったに使用されていない.

本研究は, 古記録における津波堆積物の堆積物の起源を特定し, 推論する目的で, 日本から現世の沿岸堆積物と沖合堆積物そして有孔虫の新たな定量的データセットを提供する. 2011 年の東北地方津波は九十九里の陸棚と海岸線に影響を及ぼし, 表層堆積物の均質化をもたらした可能性がある. しかし, 以下の理由から, この研究は採取した堆積物は確かに通常の背景条件を表すと仮定した: (i) この場所での津波の遡上は 2m 未満である (Mori et al., 2012); (ii) この研究における表層試料は津波の 5 年後に採取した. (iii) サンプリングは底質の上部 1cm に限定される. (iv) 明確な層構造が見られ, 津波擾乱による均質化はなされてないことを示す.

大規模な津波の発生後の底生動物相の回復速度に関する研究は, 浅海環境では, 5 日後 (Altaff et al., 2005), 50 日以内 (Szcucinski et al., 2006) または数ヶ月以内 (Yamada et al., 2014) に底生動物群の完全な回復が可能であることを示した. しかし, 南東インド沖のより深い大陸斜面の底生生物群集は, 2004 年のインド洋津波の発生から 18 か月以内には完全に回復しなかった (Khan et al., 2018). したがって, 津波と本研究で分析した表層試料の採取との間に 5 年の違いがあることを考えれば, 九十九里の陸棚と海岸線が津波前の状態に戻ったという仮定は妥当であろう.

PAM クラスター分析を用いて, 2 つの沿岸域 (陸上と沖合) を客観的に識別し, 九十九里の地域内の堆積物起源の特定と津波堆積物を記載するのに最も効果的な代替指標データセットを定量的に決定する. この研究の結果は, 粒径 (平均シルエット幅=0.40) と種組成 (平均シルエット幅=0.13) のデータセットと比較したとき, 個々の有孔虫の表面

状態(タフォノミー;2 クラスタースナリオにおいて平均シルエット幅=0.53, 3 クラスタースナリオにおいて平均シルエット幅=0.63)が堆積物の起源の最良の指標であることを示した(図5; 表1).

有孔虫タフォノミー(テスト2)は, 3 クラスタースナリオが最高のシルエット幅(平均シルエット幅=0.63)を生み出し, 生態学的に意味のある唯一のテストで, 試料の場所を潮上帯(試料の86%が適切にクラスター化されている), 潮間帯(試料の93%が適切にクラスター化されている)および沖合帯(試料の100%が適切にクラスター化されている)に分ける(図5). テスト1,3, 5~7の最も高い平均シルエット幅は3 クラスタースナリオでも生成されるが, クラスタースは複数のゾーンからの試料が混在しているため, 生態学的に意味をなさなかった. 例えば, 3 クラスタースナリオでは, 種組成データは, それぞれ50%, 40%, 100%の精度で, 潮上帯, 潮間帯, 沖合帯に割り当てた. 2 クラスタースナリオを使用した時, 試料の84%が適切にクラスター化されている陸上ゾーン, 試料の94%が適切にクラスター化されている海洋ゾーンとなり, こちらの精度の方が高かった.

Kosciuch et al. (2018) はバヌアツからの現世の炭酸塩岩礁環境における6つのゾーンを識別するためにPAM クラスタース分析を使った. 九十九里から集めた試料と同様に Kosciuch et al. (2018)は種組成データ(0.28)よりも高い平均シルエット幅(0.46)を持つクラスターがタフォノミックデータによって生成することを見出した.

しかし, 本研究とは異なり, サンゴ礁の試料は66%(種組成)と64%(タフォノミー)の精度でのみクラスター化された. バヌアツからの研究では, 種組成とタフォノミーを組み合わせると, 適切にクラスター化された試料の割合が最も高いクラスタースナリオ(94%)が生成されると結論付けられた. 九十九里では, 種組成とタフォノミーを組み合わせることで, 73%, 85%, 100%の試料がそれぞれ潮上帯, 潮間帯, 沖合の各ゾーンに適切にクラスター化される3つのクラスタースナリオを作る(図5; テスト4).

551 結論

552
553 粒度，有孔虫種組成・タフォノミーなどの堆積学的代替指標の詳細な現世分布は，海
554 岸，沿岸，沖合環境内の堆積物源を特定するため，東日本沿岸の堆積物に保存された
555 津波堆積物の同定に役立つ．現世の環境におけるこれらの堆積物源の特定は，堆積物
556 が津波によってどれだけ遠くからどのくらいの深さから運搬されたかについての洞察
557 を提供するので，津波堆積物の起源の評価に重要である．

558 地質記録における津波堆積物を適切に評価するには，マルチプロキシアプローチが
559 必要だが，この研究の結果は，オーバーウォッシュ堆積物研究では一般的に使用され
560 ないタフォノミーが，調査地域と他の温帯域の場所で，堆積物起源の制約と異常な砂
561 層の解釈の助けに最も有用なパラメータになることを示す．一方，有孔虫の種組成は
562 オーバーウォッシュ堆積物を評価するために一般的に使用される代替指標だが，単独
563 で使用した場合，沖合と陸上のゾーンを区別するには最も効果の小さいパラメータで
564 あることが分かった．本研究の結果は，九十九里における津波堆積物の堆積物源を同
565 定するためのパラメータの最良の組み合わせは種組成とタフォノミーであることを示
566 し，一方，他の研究論文は，地質記録における津波堆積物の識別においてその使用を
567 記す．これらの理由から，オーバーウォッシュ堆積物中の有孔虫の種組成を評価する
568 には，タフォノミック分析を適用することを推奨する．

569 北村晃寿・片桐 悟