

要約

津波による堆積過程は、地形、堆積物の供給源、津波の条件によって多様であり、かつ広域で津波堆積物のデータが十分には収集されていなかったため、その類型化は行われてこなかった。しかし、現世津波から得られる知見を古津波に応用していくためには、津波による堆積過程の類型化が必要である。また、津波堆積物から引き出せる情報は、調査地点の空間スケールによって異なると考えられるが、そのような検討も行われてこなかった。このような問題意識のもと、古津波による堆積過程の理解や古津波の推定精度の向上に貢献することを目的として、2011年東北地方太平洋沖地震津波（以下、2011年津波）によって形成された堆積物を対象として、地形条件ごとの津波による堆積過程の類型化、および異なる空間スケールで津波堆積物から引き出せる情報の比較を行った。

調査地域は、宮城県七ヶ浜町から福島県南相馬市小高区までの南北約 80 km の仙台平野と常磐海岸に位置する海岸低地とした。この地域を選定した理由は、波高や周期、流速などの津波の入射波条件がほぼ類似していると仮定できるため地形条件が堆積過程に与える影響を詳細に議論できること、堆積物の保存状態も比較的良く、様々な空間スケールでの調査が可能なおことにある。調査は、長さ 0.6～5.4 km の 16 測線を海岸線から浸水限界まで海岸線と直交方向に設定し、一定間隔で設けた計 385 地点において実施した。さらに、宮城県山元町の奥行き約 2 km の谷底平野では、空間スケールの影響を評価するため、谷内の浸水域全体を覆うように数 10 m 間隔で設定した計 174 地点において面的な堆積物調査を実施した。

調査の結果、いずれの調査測線においても、2011年津波によって砂と泥からなる津波堆積物が形成されたことが明らかとなった。本研究での観察結果に基づくと、16 測線のうち、6 測線は低地の奥行きが 3 km 以上ある広い海岸平野、3 測線は低地の奥行きが 3 km 未満の狭い海岸平野、4 測線は地形勾配が 1/500 以上と大きい谷底平野、2 測線は地形勾配が 1/500 未満と小さい谷底平野、1 測線はラグーンを持つ海岸低地に区分されることがわかった。このように区分された各測線について、津波堆積物の供給源や堆積量、浸水距離との関係、層厚や堆積構造の変化の傾向について検討し、地形条件による堆積過程の類型化を行った。

砂質津波堆積物の主な供給源は、侵食量と堆積量の収支、粒度分析結果、および珪藻分析結果から、いずれの測線においても海浜砂と砂丘砂であると考えられる。海域からの砂の移動量が少ないことは、土砂輸送に大きく影響する沖合の水深 15 m 以浅の浅海域が急勾配であることと関係している可能性が高い。一方、泥質津波堆積物の主な供給源は、泥の分布域、侵食量と堆積量の収支、および珪藻分析結果から、水田土壌と考えられる。これは、水深 15 m 以浅の底質に泥がほとんど含まれないことや浸水した海岸低地の大部分が水田として利用されていたことと関係している。また、ラグーンを持つ海岸低地では、珪藻分析結果から、ラグーンの底質が陸上へ供給されていることがわかった。このように、津波堆積物の供給源は、浅海域の地形勾配や津波の通過経路上にもともと堆積している表層物質に強く依存していることがわかった。

砂の堆積量と浸水距離との関係は、奥行きが広い平野では、浸水距離に関係なく堆積量がほぼ一定値であるのに対し、その他の地形条件では両者は比例関係にある。つまり、奥行きが広い平野では、砂の到達限界（供給距離に相当）や堆積量（供給量に相当）に上限値が存在するのに対し、その他の地形条件では、浸水距離に応じて砂層の到達限界や堆積量が一定の割合で増加していることになる。これらに上限値がみられるのは、海浜や砂丘における砂の供給過程と関係している可能性がある。そこで、既存の数値計算結果やビデオ映像の解析結果、観測波形との比較を行ったところ、砂の到達限界や堆積量の上限値には、海浜や砂丘で流速と水位の上昇が持続した約 20 分間のうちに巻き上げることができた砂の量と輸送可能な距離が反映されることがわかった。一方、その他の地形条件では、遡上流が浸水限界に達した後は、崖地形による反射波や地形勾配による引き波によって遡上流が相殺され、遡上方向への流れが停滞もしくは弱化することで、海浜や砂丘からの砂の供給が停止したと考えられ、砂の分布限界や堆積量が浸水距離に比例した可能性がある。

砂層の層厚は、奥行きが狭い平野では内陸薄層化しないが、その他の地形条件では、大局的には内陸薄層化する。奥行きが狭い平野では、津波が海浜・砂丘から砂を十分に運搬できる 3 km 程度の距

離に対して、崖地形により浸水距離が短くなり、地形も平坦であるため、浸水限界付近まで津波の土砂運搬能力や砂の供給量が大きい状態で維持されると考えられる。それに対して、その他の地形条件では、海岸線からの距離や標高の増加に伴って、遡上途中で津波の持っている土砂運搬能力や砂の供給量が低下したと解釈される。

津波堆積物中には、偽礫、平行葉理、正級化といった堆積構造が観察された。偽礫の分布から、海岸線から 1.7~3.3 km までは偽礫の形成に必要な最大 1.9 m/s 以上の流速が維持されていたと考えられる。同様に、平行葉理の分布から、海岸線から 0.3~2.2 km までは平行葉理の形成に必要な 0.6~1.0 m/s 以上の流速が維持されていたと推定される。正級化の分布から、地形勾配が大きい場所では強い引き波が発生しやすいため流れが停滞しにくく、地形勾配が小さい場所では流れが停滞しやすかったと判断される。

奥行きが広い平野や奥行きが狭い平野では、砂層は 1 層のみで構成される。一方、その他の地形条件では、砂層は 1~5 枚の層から構成される。砂層のユニット数から、奥行きが広い平野や奥行きが狭い平野では、第 1 波押し波による堆積が卓越し、第 2 波以降による堆積作用がなかったと考えられる。それに対して、その他の地形条件では、第 2 波以降による堆積作用があったと解釈できる。両者の違いは、第 2 波以降の波高と障壁となる砂丘の高さとの関係に起因し、砂丘を乗り越えることができた遡上波の回数の違いを反映している可能性が高い。

以上の結果から、陸上や海底の地形勾配、低地の奥行き、ラグーン、砂丘の高さなどの地形的要因が、津波による堆積過程を変化させる要因として重要なことがわかった。本研究では、これらの地形的要因と津波の入射波条件との関係を用いることで、津波による堆積過程を模式化することができた。

次に、宮城県山元町の谷底平野での調査結果を基に、各掘削地点での津波堆積物の堆積学的特徴の多様性、各掘削地点の代表性、局所的な変化、全体的な変化、谷底平野全体を代表する値の 5 つの異なる空間スケールにおいて、津波堆積物から引き出せる情報の違いを検討した。各掘削地点での津波堆積物の堆積学的特徴は、その地点を通過した津波の流況や堆積物の運搬形態の時間的な変化を反映し、最終的に形成される堆積物の層序は多様となる。そのため、一地点の情報からは局所流況しか推定することができないと判断される。一方、地形が平坦な範囲で数 m 程度離れた地点間の比較を行うと、砂層の層厚は微地形の凹凸の影響を受けて変化するが、その変化量は微小だった。したがって、ある地点の津波堆積物の層厚を、周囲数 m 程度の範囲内の層厚の代表値としても問題ないと考えられる。より大きな空間スケールで局所的な変化を考察すると、掘削地点を特徴づける海岸線からの距離などの絶対的指標のみではその変化を説明できず、周囲の地形を含めた相対的な地形状況を考慮することで、津波の挙動と堆積物の局所的な変化の関係性を議論することができる。谷底平野全体を対象とした空間スケールでは、より小さなスケールでの局所変化を内在しながらも、全体的には砂層の層厚や粒度が内陸薄層化や内陸細粒化するという特徴を見出すことができる。これらの傾向は、津波の土砂運搬能力や供給される砂の粒径の減少により説明される。谷底平野全体での津波堆積物の堆積量や分布限界などをこの地域の代表値とみなすと、これらの値には調査範囲の地形条件に起因する津波の特性が反映されており、地形条件や津波の特性の指標として有用であることがわかった。

本研究の成果は大きく次のように整理できる。本研究では、入射波条件が類似した、仙台湾沿岸と常磐海岸での多様な沿岸地形を対象として、堆積過程が地形条件によってどのように変化するかを類型化し、堆積過程を変化させる地形的要因を模式化することができた。つまり、津波堆積物の形成にとって重要なのが地形条件、入射波条件、堆積物の供給源の条件であることを考えると、地形条件と堆積物の供給源の条件がわかれば、津波の周期や波高などの入射波条件を推定できる可能性がある。また、空間スケールごとで津波から引き出せる情報が異なることを詳細に明らかにすることができた。特に、各調査地点や局所的な変化では多様に見える津波堆積物の特徴は、大局的な変化を見ることで地形条件ごとでの類型化が可能になる。そして、堆積量や分布限界のような調査範囲を代表する指標を用いることで、地形条件と供給源が既知であるという条件のもと、古津波の入射波条件を推定できる可能性が示された。これらの成果は、古津波による堆積過程の理解、古津波の挙動や規模の推定精度の向上にとって重要な知見になると考えられる。