

遠州灘鮫島海岸に見られる板状海浜砂固物及び鉢巻石の形態と成因

静岡県立磐田南高等学校
理数科課題研究地学班・地学部地質班 2年 妹尾 梨子 他 13名

1. 動機・目的

静岡県の遠州灘に面した鮫島海岸（図 1 参照）において、部活動の野外調査の最中に、波打ち際付近で砂浜の表面が固まった領域があることを発見した。固まった砂の上では歩きやすいことから、部活動ではそこを歩くことが多かった。ここは自動車の走行も可能なため、釣りやサーフィンの車両が砂浜に乗り入れる場合は、必ずこの固まった砂の上を選んで走っている。また、この砂の固まりの周辺には、リング状に白色の線が取り巻く礫が点在していた。しかし、これらを文献で調べても、その形態や成因は不明であった。そこで、この砂の固まりや礫の形態と成因を解明することにした。



図1 鮫島海岸の位置

2. 海浜砂固結物の定義

先行研究が無いため、この「砂の固まり」を独自に「海浜砂固結物」と命名した。そして「海浜砂固結物」の定義を「人為によらず自然界の物理、化学的作用により固結した海浜砂」と定めた。また、「鉢巻石」は、海浜においてリング状に白色固結物が付着した礫と定義した。

3. 海浜砂固結物の分類

海浜砂固結物を鮫島海岸での詳細な形態の観察により、表 1 のとおり 4 種類に分類した。

表1 海浜砂固結物の3つの分類と鉢巻石

① 平坦面型板状	② 平坦面型塊状	③ 崖型	④ 鉢巻石
			
最初に発見した「砂の固まり」で、汀線に沿った前浜に、幅数 m の帯状に、砂の表面の数 mm が板状に固結している。	前浜から砂丘にかけての広い領域に分布する。平坦な砂浜の上に不定形の塊として点在する。	汀線に沿って波浪が強い時に出現する崖状に地形の鉛直面で固結している。様々な形状が見られる。	3 形態のほかに鉢巻石があり、これは板状海浜砂固結物に取り込まれている。

4. 成因に関する仮説1

野外調査で発見された 3 つの形態の海浜砂固結物のうち、最初に発見された板状固結物とそれに関係する鉢巻石が分布面積も広く、海浜砂固結物の基本形であると考えた。そこで本研究では、まずそれらの成因を追究した。ここで仮説 1 を立てた。

仮説 1：板状固結物は、波の飛沫が風送塩として風に飛ばされて砂に降り注ぎ、水が蒸発することによって析出した塩の結晶が砂の粒子を繋ぎ止めて生じる。

5. 標本の採取

板状固結物及びその周辺の砂を採取した（図2参照）。方法は、まず海岸線に垂直な方向に前浜から後浜にかけての区域を設定し、次に2m間隔で固結区10地点、その陸（北）側の非固結区3地点、海（南）側の非固結区3地点の計16地点を決めた。さらに1地点を表層、中間層、下層の各3層準に分け、計48箇所を採取した。

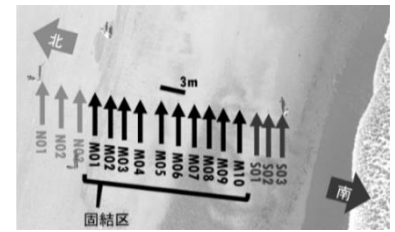


図2 採集地点

6. 粒度組成

砂の粒径と板状固結物形成の関係を調べる目的で、粒度組成分析を行った。方法は篩を用いて砂を粒径ごとに分け、それぞれの篩に残った砂の質量を電子天秤で量った。結果を図3に示す。図3より、海側の下層では粗粒な砂が見られるものの表層の固結区と非固結区の砂では、粒径に有意な差は見られなかった。従って砂の粒径の違いは、固結物の形成に影響しないことが分かる。

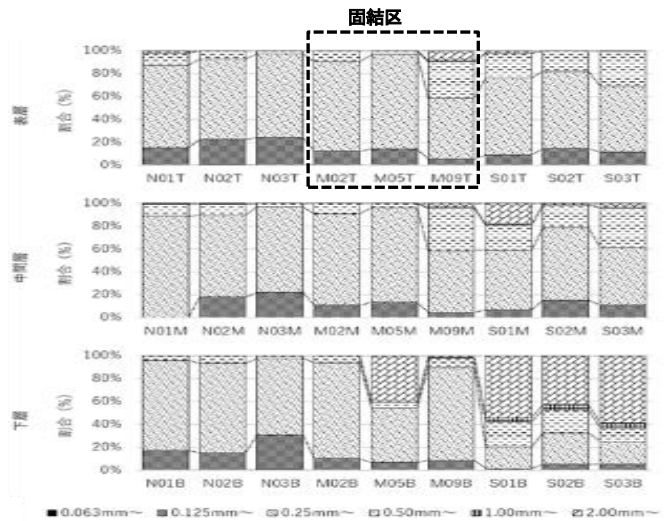


図3 粒度組成

7. 鉱物組成

砂の鉱物の種類と板状固結物形成の関係を調べる目的で、双眼実体顕微鏡を用いて鉱物組成分析を行った。結果を図4に示す。図4より、固結区と非固結区の砂の鉱物組成に有意な差は見られなかった。従って、砂の鉱物の種類や性質が固結物の形成に関与していないことが分かる。

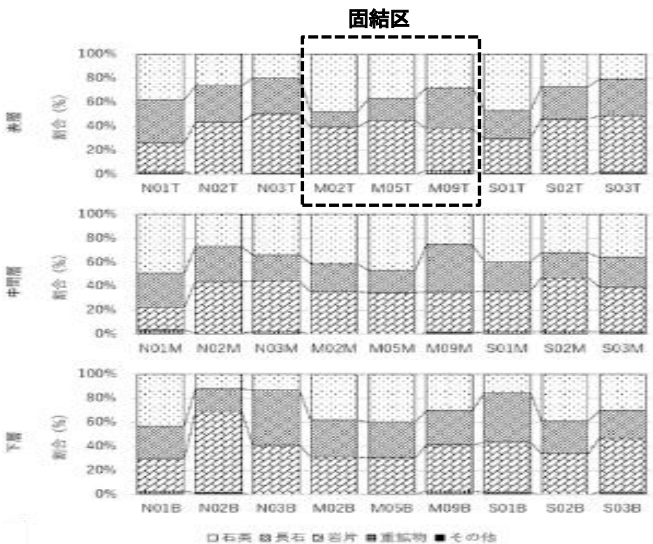


図4 鉱物組成

8. モール法によるCl⁻含有量の測定

海水と板状固結物形成の関係を調べる目的で、モール法を用いて砂に含まれるCl⁻イオンの量を測定した。結果を図5に示す。海側非固結区と固結区の表層の砂からはNaClの質量に換算して0.3~1.0%のCl⁻イオンが検出され、中間層、下層の順に検出量は低下していた。一方、陸側非固結区では、何れの層もCl⁻イオンの検出量は0.01%程度で極めて少なかった。このようにCl⁻イオンの量は汀線より約30m離れた固結区と陸側の非固結区の境界付近から不連続で急激に減少する。もし固結物の形成に風送塩が関与するのであれば、汀線より500m付近から徐々に減少するはずである。従って固結に関与する塩は風送塩ではなく、海側から供給される海水の塩の可能性が高い。そこで、新たな仮説を立てた。

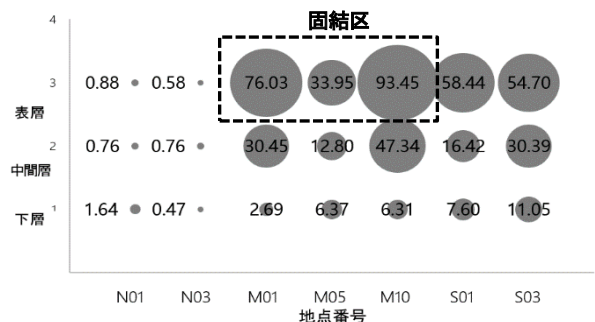


図5 Cl⁻イオンの含有量

9. 成因に関する仮説2

仮説2：板状固結物は、磯波の遡上により海水が砂浜の砂

を覆い、その後海水が蒸発することによって析出した塩の結晶が砂の粒子を繋ぎ止めて生じる。

10. ドローンの空中撮影による板状固結物の水平分布

2つ仮説のどちらが正しいかを検証するために、板状固結物の水平分布を調べた。方法は図6のようにドローンによる空撮を行った。但し、板状固結物を遠方から視覚的に識別することは困難であるため、予め板状固結物の陸側の輪郭をCaCO₃が主成分のラインパウダーでなぞった。空撮画像を図7に示す。図7より板状固結物の陸側の北限を示すラインパウダーの輪郭は汀線に平行であり、流木等の漂着物の分布と一致していた。従って、板状固結物が分布する範囲では、海水が直接被っていることが分かる。

よって「板状固結物の形成に風送塩が関係する」とした仮説1は否定され、「磯波の遡上により海水が砂浜の砂を覆い、その後海水が蒸発することによって形成される。」という仮説2が支持された。

11. 海水とNaCl水溶液の噴霧量ごとの再現実験

砂を繋ぎとめている成分は、海水中で最も多く含まれるNaClではないかと予想した。そこで、NaClが板状固結物の形成に主要な働きをしていることを確かめること、塩の供給量の違いによる影響を調べることを目的として、以下の方法で再現実験を行った。

方法は次の通りである。まず、洗浄して塩分を抜いた鮫島海岸の砂を100gずつ20枚のシャーレに入れ、表面を平坦にならした。次に海水と海水の塩分濃度計測値と同じにしたNaCl水溶液をそれぞれ同型の園芸用の大型霧吹きに入れ、霧吹きの噴霧口が下に向くようにスタンドに固定し、海水とNaCl水溶液のそれぞれを図8のように1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256回に分けてシャーレに噴霧した。また対照実験として、何も吹きかけないシャーレと、砂が浸るまで純水を入れたシャーレを用意し、砂を1週間自然乾燥させた。この結果、32回以上噴霧した砂では板状固結物が再現できたが、16回以下と純水を入れた砂では固まらなかった。このように実際の板状固結物もNaClを主とする海水の塩により形成されると考えられる。

12. 走査型電子顕微鏡による形態の観察と特性X線による化学組成の定性分析

微細構造をより詳細に観察する目的で、走査型電子顕微鏡を用いて板状固結物を観察し、同時に特性X線定性分析を行った。また鉢巻石に付着していた砂と白色の物質も併せて観察した。この結果、砂粒の表面に付着した図9のような直径50μm程度の粒状の構造と、図10のような砂粒の間に伸びた太さ50μm程度で中間部が細くくびれた柱状の構造が見られた。通常の固まっていない砂にこのような物質は見られない。従ってこれらの構造は海水の塩できていると推測され、特に柱状構造は砂粒を繋ぎ止める働きをしていると考えられる。また、化学組成の定性分析の結果、粒状構造と柱状構造からはNa, Cl, Mg, Ca, S等が検出された。これより、これらの構造はNaCl, MgCl₂, CaSO₄等の海水に含まれる塩から構成されていることが分かった。

さらに走査型電子顕微鏡で観察すると、板状固結物の砂粒の表面には、図11のような多角形の輪郭を持ち、薄く広がったシート状の塩の結晶が見られた。板状固結物には、このようなシート状構造が



図6 ドローンによる空中撮影

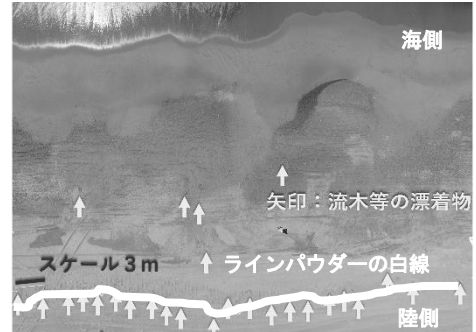


図7 空中撮影による海浜砂固結物の水平分布



図8 噴霧器による再現実験

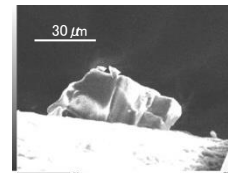


図9 粒状構造

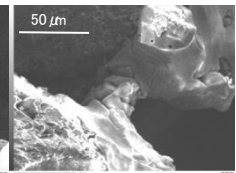


図10 柱状構造

支配的であることから、実際に結合に関与しているのは光学顕微鏡では見えにくいシート状の塩であると考えられる。一方、鉢巻石に付着した白色の物質は、図12のような不規則な凹凸のあるブロックを積み上げたような立体的な形状をしていた。両者の違いは、板状固結物ではゆっくり時間をかけて海水が蒸発するのに対し、鉢巻石では礫が日射を受け高温になることで海水が急激に蒸発するためであると推測される。これを検証する為、次の実験を行った。

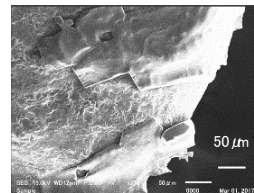


図11 シート状構造

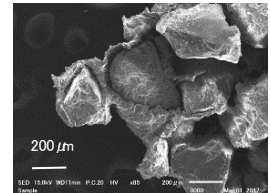


図12 立体的構造

13. 海水・NaCl 水溶液の温度ごとの再現実験

塩分を抜いた砂 50cm³ を 50mL ビーカーに入れ、更に海水、NaCl 水溶液、純水を砂が浸かるまで加えたものと何も加えないものを、各2つずつ用意し、同じ条件のビーカー2つのうち、一方を1週間自然乾燥させ、もう一方を80℃に保った恒温乾燥器に3時間入れた。純水を加えたものと何も加えなかった砂のみは、温度条件に関わらずどれも固まらなかった。海水を加えたものと NaCl 水溶液を加えたものは、すべて表面に板状固結物を生じたが、自然乾燥させたものは天然のものに酷似していた。一方、高温乾燥させたものは図13のように白色になっていた。よって鉢巻石の白い模様は、礫が日射を受けて高温になり、海水を急激に蒸発させることで塩が立体的に析出して生じると推測される。そこでこれを確かめる目的で、次のサーモトレーサーを用いた実験を行った。

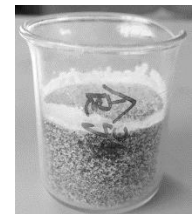


図13 再現された白色固結物

14. サーモトレーサーを用いた温度上昇の観察

方法は、2つのアルミニウム製のバット上に、真水で洗い塩分を抜いた砂 1,000g を平らに敷く。鮫島海岸にて、同じ岩石でかつ、ほぼ同じ大きさである礫を2つずつ、9組採取し、それぞれの礫を2つのバットの砂の上に並べて置いた。一方のバットに砂全体が湿るまで海水を噴霧し、もう一方のバットには何も加えなかった。2枚のバットを、図14のように床との間にコンクリートブロックと白色の段ボール板を介して本校北館屋上に置き、温度上昇の様子をサーモトレーサーで観察した。天気は快晴であった。床との間に土台を噛ませた理由は、床からの熱伝導を防ぐためである。また、サーモトレーサーは USB 接続ビデオキャプチャーを用いて PC と接続し、映像を動画として記録した。結果は次のとおりである。



図14 屋上でのサーモトレーサーの実験

- (1) 実験開始直後 : 海水を噴霧したバットは、しないバットより温度が低い。
- (2) 実験開始後3分 : 海水を噴霧しなかったバットは、したバットよりも先に温度が上昇する。
- (3) 実験開始後10分 : 噴霧したバットでは礫の温度が砂よりも先に上昇している。
- (4) 実験開始後85分 : この時点まで噴霧したバットで礫の温度が砂に比べて高い状態が継続する。

また、時間に伴う温度変化を図15に示した。これらの変化は以下のとおりに説明できる。実験直後の海水を噴霧したバットの温度が低いのは、蒸発熱が奪われるためである。実験開始3分後では、海水を噴霧したバットの温度の変化はわずかだが、噴霧しないバットは温度大きく上昇している。これも砂が湿っていると連続的に蒸発熱が奪われるためである。実験開始10分後からは、噴霧したバットの温度も上昇し始めるが、砂より礫の温度が先に上昇する。実験開始後30-85分にかけて、砂が30℃程度、礫が50℃程度の状態が継続した。これは、砂のみが海水を吸って蒸発熱が砂から奪われるためである。さらに、砂よりも礫の方の温度が高くなるのは、礫の熱伝導率は平均2.3 [W/m・K] であるのに対して、砂の熱伝導率は0.63 [W/m・

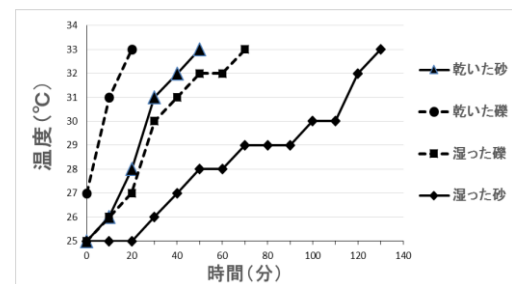


図15 砂と礫の温度変化

これは、砂のみが海水を吸って蒸発熱が砂から奪われるためである。さらに、砂よりも礫の方の温度が高くなるのは、礫の熱伝導率は平均2.3 [W/m・K] であるのに対して、砂の熱伝導率は0.63 [W/m・

K) で、礫の方が太陽放射を伝導させやすいためである。

この結果、実験では海水を噴霧したバットにおいて鉢巻石が再現された。しかし上記の実験と同様に海水を噴霧した砂の上に礫を置き、室内に放置したバットでは鉢巻石は形成されなかった。これによっても、日射による温度上昇が鉢巻石の形成に必要であることが裏付けられた。実際の海岸でも、海水を被った後、砂の温度は時間をかけて上昇する一方で、礫は急激に高温になるという現象が起きているために、鉢巻石が形成されると考えられる。

15. 板状固結物の形成モデル

研究結果をもとに板状固結物の形成モデルを作成した。

- (1) 満潮時やストーム時の波浪により前浜の奥部まで海水が侵入する。
- (2) 波が引くと砂が含みきれない海水は地中に浸透して逃げ、地表付近には一定量の海水が残される。
- (3) 礫は水を含まず蒸発熱の影響を受けないので、速やかに 50°C程度の高温となる。すると海水が急激に蒸発して塩が立体的に析出する。これが白く発色し、鉢巻石を生じる。
- (4) 砂は気化熱の影響を受けるので 30°C程度の低温に保たれ、海水が徐々に蒸発して塩が砂粒の表面に薄く析出する。これが砂粒を接着し、板状固結物を形成する。

16. 結論

- (1) 鮫島海岸で自然に形成される砂の固まりを発見し、「海浜砂固結物」と命名した。
- (2) 海浜砂固結物を平坦面型板状、平坦面型塊状、崖型の3形態に分類した。また板状固結物に取込まれて白色の模様がついた礫を「鉢巻石」と命名した。
- (3) 板状固結物は、砂が波を被り、海水が時間をかけながら蒸発して、30°C前後で砂粒の間に光学的には見えない薄い塩の結晶が析出することで生じる。
- (4) 鉢巻石は、日射を受けて礫が 50°C前後の高温になり、海水が急激に蒸発することで礫の周りに立体的な塩の結晶が析出して形成される。

17. 今後の課題

- (1) 板状以外の形態の海浜砂固結物の成因を解明する。
- (2) 他地域の海岸でも同様のメカニズムによる海浜砂固結物を確認する。

参考文献・参考ホームページ

- ・愛知県総合教育センター, 理科・CST の広場, 高等学校化学, モール法でしようゆの塩分濃度を求める, <http://www.aichic.ed.jp/contents/rika/koutou/kagakuka7/mohr/mohr.htm>.
- ・久保公雄ほか, 1984, 鋳物, 第59巻, 第3号, 143-150.
- ・日本電子株式会社, 製品情報, 理科学・計測機器, 走査電子顕微鏡, JSM-IT100, InTouchScope™ 走査電子顕微鏡, <http://www.jeol.co.jp/products/detail/JSM-IT100.html>.
- ・斎藤隆夫, 2010, 旺文社化学事典(電子辞書収録版), 旺文社.
- ・静岡理工科大学, 附属施設, 先端機器分析センター, 走査型電子顕微鏡, <http://www.sist.ac.jp/pdf/kiki/SEM2.pdf>.
- ・数研出版編集部, 2006, 改訂版フォトサイエンス化学図録, 数研出版株式会社, p. 73.
- ・理科年表, 溶解度の一覧.
- ・海水溶存資源の正体は?, http://www.geocities.jp/t_hashimotoodawara/salt6/salt6-07-02.html.