海岸及び海底の rhythmic pattern について

茂 木 昭 夫

一見直線状に見える砂浜海岸が、くわしく見るとほぼ同じ大きさの彎入部が連なり、彎入部間の cusp 状岬が同間隔に配列している事が、次第に明らかになって来た。普通海岸に見られる beach cusp はこの rhythmic pattern の 1 種で、この種の中では最も規模の小さなものである。一方筆者は瀬戸内海の海底から多数の sand wave を発見した。この sand wave は波形の断面を有し、ほぼ同じ波長で連なっている事を特徴とする。海底に在在する ripple mark は、この種の地形の最も規模の小さなものである。

1950 年 Kuenen はその著 "Marine Geology" の中で、この種の地形を "Rhythmic Accumulation" として一括して記載した¹⁾。即ち Rhythmic Accumulation の type を ripple mark, larger rhythmic accumulations, beach cusp の 3 つに分類して記載している。

Kuenen がこれらの地形の間に、どれ程の共通性を認めているかは明らかでないが、この種の地形を一括して扱っている事は、大いに注目すべき事である。確かにこれらの地形は、rhythmic pattern を示す点ではよく類似しているのである。

然しこの様な rhythmic pattern を形成する機構を考えた場合、ripple mark と beach cusp の間に、どのような共通性を考え得るかは、今の所甚だ疑問であろう。一方 ripple mark の中の更に規模の大きい sand wave と、beach cusp の中の更に規模の大きい海岸線の undulation を対照として考えた場合、両者は形態的にも成因的にも著しく接近してくる様に思われる。

この様な比較的類似した地形について、その類似性と相異点を十分明らかにする事により、個々の問題については説明困難であった問題

も、案外容易に説明する事が可能である場合を我々は経験している。この様な観点から、両者を比較、対照し乍ら、その類似性と相異点に着目し、これらの問題を見直してみようというのが、本稿の目的である。

1. 海岸の rhythmic pattern

砂浜海岸に見られる規模の小さい beach cusp や、逆に大規模な尖角岬 (cusped foreland) の地形は古くから知られているが、一見直線状に見える海岸線が、数 100m の span を有する彎入部の連続からなる事が注目されたのは、比較的最近である。

最初にこの地形に注目したのは Per Brunn であろう²⁾。Per Brunn はオランダの北海沿岸において、 10^3m 、 10^2m 及び 10^1m の 3 種の order の shoreline waves を測定し、これらが海岸に沿い $0\sim 1000\text{m/year}$ の割合で移動している事を明らかにした。そして最も大きな彎入部は、rip current の通路と考えられる沿岸州の切れ目と結びついているのでであろうと推定した。

日本で最初この問題を論じたのは小向良七³⁾である。小向は「函館大森浜の海岸侵蝕」の名著の中で、同海岸に存在する矢張り 3 種の order の rhythmic pattern について、極めて詳細に記述している。小向によれば、大森浜海岸には波長 700m 前後、170~250m 及び 8~22m の 3 種の rhythm が存在し、その中後二者を cusp と呼んだ。そして多数の観測結果から前二者は消滅又は変移する事はないが、span の変形は顕著に見られ、大森浜湾奥部を中心に、その西方では彎入部西側、東方では彎入部東側が侵蝕される傾向があり、季節風の卓越する冬季には apex 部が侵蝕されて彎入度を

1) Kuenen, Ph. H. (1950) : Marine Geology

2) Per Brunn (1954) : Migrating sand waves and sand humps, with special reference to investigations carried out on the Danish North Sea Coast. Proc. of 5th Conference on Coastal Engineering, pp. 269-295

3) 小向良七 (1956) : 函館大森浜の海岸侵蝕, 水路部報告, Vol. 13 (上), pp. 1~215

浅くし、台風季には逆に彎入度を深くする事を明らかにした。

1960年筆者は東海村海岸の調査において⁴⁾、波長2000m前後、300m前後及び60~30mの3種のshore line rhythmsを認めた。60~30mのものは通常のcuspである。こゝで筆者は、これらの海岸線のundulationと一致したrhythmが、沖合の沿岸州に存在する事を明らかにし、両者の関係を碎波によるswashとrip currentによって説明した。更にPer Brunnが指摘した様に、海岸線のundulationは沿岸流の方向に約1000m/yearの割合で移動した事を示し、その際沖合の沿岸州も海岸線の移動と符節を合わせて移動している事を明らかにした。類似の結果が、同海岸を海底工学の立場から調査していた本間仁、鮮干徹等⁵⁾によって公表された。

その後筆者^{6) 7)}は深淺測量結果に基づき、鮮干は^{8) 9)}航空写真の判読によって、海岸線と沿岸州に見られるrhythmic patternを各地から明らかにした(茂木:1960, 1963, 鮮干1963a, 1963b)。

ここで鮮干はshoreline wavesと沿岸州との間に存在する重要な関係を見出した。即ち沿岸州は海岸とは反対に沖の方に彎曲した円弧状をなし(第1図)、その脚は海岸彎入部間の突出部に連なる事を確めたのである。従って先に

第1図 砂浜海岸における rhythmic topography のブロックダイアグラム。

海岸 undulation と円弧状 bar, 三ヶ月形 trough との一致した関係が示されている。

筆者が指摘した関係は、この様な沿岸州と海岸彎入部との一対になった関係に由来するものであり、沿岸州と海岸の undulation の一致した移動は、この様な単元の移動として解釈されるわけである。鮮干は更にこの様な rhythmic pattern の成因に言及し、海底にほぼ同間隔に配列する浅い溝を想定し、この溝と海岸との交わる海岸線は、当然波状の海岸線を形成するだろうと述べた。然しこの様な溝の存在について、鮮干は新潟海岸における田山¹⁰⁾等の論文を援用しているが、その実在は疑わしく、又たとへ実在しているとしても、海岸の問題を海底におきかへたに過ぎず、その根本的な解決にはならないのである。

2. 海底の rhythmic pattern

河口底や潮間帯に ripple mark に類似した大規模な砂の波が形成されている事は、早くから知られているが、海底にこの様な大規模な地形が多数形成されている事が知られたのは、比較的最近の事に属する。ヨーロッパでは、北海においてこの種の地形が見出されて、研究が行われているが^{11) 12)}、日本では瀬戸内海において、初めて筆者¹³⁾等によりくわしく調査、研究された(茂木・加藤:1962)。

この大規模な砂の波は、sand wave または giant ripple と呼ばれ、実験的には流速の増加と共に、最初に ripple mark を形成し、或る限界流速を超えるとこれが消滅するが、更に第2の限界流速に達すると、m 単位の大規模な sand wave が形成されるという事が知られている。

これ迄の調査、研究によると、これらの sand wave は潮汐の大きい海域や河口等の、比較的流れの強い所に存在する。大体 1.5~3.0kt の流速の所に存在し、流速 3.0kt を超えた場合に

- 4) 茂木昭夫 (1960): 東海村沿岸の地形変化について 地理評 Vol. 33, 8, pp. 393~411
- 5) 本間 仁・堀川清司・鮮干 徹 (1959): 東海村海岸調査報告書 (第1報), pp. 1~227
- 6) 茂木昭夫 (1960): 東北地方の海浜型について, 東北地理 Vol. 12, 103~114
- 7) 茂木昭夫 (1963): 日本の海浜型について, 地理評 Vol. 36, 245~266
- 8) Homma M. and Sonu C. (1963a): Rhythmic pattern of longshore bars related to sediment characteristics, Proc. of 8th Conference on Coastal Engineering.
- 9) 鮮干 徹 (1963b): 航空写真の海岸工学への応用, 写真測量学会例会演旨
- 10) 田山利三郎・浦井鎮吾・瀬尾正夫・星野通平 (1951): 新潟近海における海底地形の概要と底質の分布, 新潟県海岸対策委員会報告書, 第一輯, pp. 21~39
- 11) コーニツシュ (1934): 海の波 (日高孝次訳)
- 12) Per Brunn (1954): 前掲 2)
- 13) 茂木昭夫・加藤俊雄 (1962): 備讃瀬戸東部の sand wave について, 海洋地質, Vol. 1, pp. 2~12

は見られなくなる。3.0kt 以上の流速の所では砂の堆積物がなくなり、殆んど岩盤、礫のみを分布する為である。一般に流れの方向に対し直角に crest を有し、ほぼ同間隔に配列するのを特色とする（第2・3図）。底質とは密接な関係が存在し、細礫、粗砂、中砂の所にもみ見られ、細砂、泥、礫の所には見られない。細礫～中砂の間では、一般に粒径が大きい程 sand wave の規模が大きく、その関係は粒径の平方根に比例する事が明らかにされている。

第2図 備讃瀬戸東部日比・大崎鼻間海底に見られる sand wave の分布。線は sand wave の crest を示してある。

第3図 sand wave の横断面図
大槌島南側の大規模な sand wave の横断面である。

筆者等が備讃瀬戸において発見した sand wave には、波長 10~40m, 波高 0.5~2.0m (I 型), 波長 60~150m, 波高 2.0~10.0m, (II 型) 及び波長 200~350m, 波高 15~24m, (III 型) の3種が存在し、潮流により移動する事が明らかにされた。この中 I 型と II 型のは互に共存し、ある場合には I 型の sand wave が優勢であり、或る場合には II 型の sand wave が優勢で、I 型の sand wave が II 型の sand wave の斜面に附随している場合が見られた。移動、変形の観測結果によれば、I 型の小 sand wave は活発に変化し、ある場合にはこれらが集中して II 型の sand wave に変わろうとし、ある場合には離散して II 型から I 型に変わろうとする動きが見られる。

筆者等の調査によって、sand wave の形成されている地点では、平均流速に対し底質粒径が細か過ぎて、底質は saltation の状態で運搬の過程にある事が明らかにされた。sand wave は特に海底砂州の先端部に顕著に発達しているが、過去数十年の間にこの部分の水深変化が顕著である事からも知られる様に、この部分は特に潮流変化の激しい部分に当り、弱流によって堆積された細粒底質が、強流にさらされることにより saltation の状態で運ばれ、そこに sand wave を生じたと解釈される場合が存在する。

sand wave を含む海底の rhythmic な地形の直接の成因について、Kuenen¹⁴⁾ や Cornish¹⁵⁾ は vortex の作用に帰し、Bagnold¹⁶⁾ は saltation の運動に帰しているが、本質的な相異はないと考えられる。

14) Kuenen, Ph. H (1950) : 前掲 1)

15) コーニッシュ (1934) : 前掲 11)

16) Bagnold R. A. (1954) : The Physics of Blown Sand and Desert Dunes

3. 海岸及び海底に見られる rhythmic pattern の類似性

前節において、海岸に見られる undulation 及び海底に存在する sand wave について、夫々の特性を述べた。両者の間には、単に形態的に rhythmic pattern を形成している点で類似しているだけでなく、多くの共通性が認められる。これらの類似性と相異点のせん明は、この種の地形の成因を考察する上に、極めて重要であるので、以下に列記して簡単な考察を加へる。

(1) 海岸の undulation も海底の sand wave も、共に rhythmic pattern を形成する。然もその rhythm の大きさには大きな相異がなく、order において大体類似している。

これは両者の類似点の最も重要な根本的性質であり Kuenen がこの点のみに着目して同じ分類下に入れている事からも察せられる。

(2) sand wave の断面形も海岸の undulation の平面形も、共に cusp 状に尖った形を示す。両者の相異は前者においては垂直断面内にある事だけである。これは深い海底における水の流動が、垂直断面内に生じ得るに対し、海岸部における水の流動が、水が薄層である為、水平断面内にしか生じ得ない事に由来する。従って水の流動方向に対するこれらの地形の関係は、全く同じと見て差支えない(第4図)。

(3) sand wave における I 型と II 型との共存関係と同じ様に、海岸の undulation にも大きな波長のものの中に小さな波長のものが共存している。又海岸 undulation の場合も sand wave の場合も、非対称断面形が見られる。

(4) sand wave を構成している物質は主とし

第4図 海岸及び海底の rhythmic topography とこれに作用する水の運動方向を示す。太実線で示される平面内において矢印で示した様な方向の水及び砂粒の運動が起ることを示す。

上：波状海岸線の場合

下：sand wave の場合

て砂であり、海岸の undulation も砂質海岸に形成されている。sand wave の場合、砂の流動は海底面から垂直断面内を跳動しているが、海岸の undulation の場合も、砂は海岸からの水平断面内を跳動するものと考えられる。

(5) sand wave は流れの方向に対し、直角方向に crest を向けて配列するが、海岸の undulation の場合も亦、沿岸流に対し直角方向に cusp 状岬を向けて配列する(第4図)。

(6) sand wave の移動、変形の形式と、海岸 undulation の移動、変形の形式は甚だよく類似している。即ち両者共第5図の様に、形を余り崩さず平行に移動する場合があります。sand wave における crest の比高の変化、海岸 undulation の場合の span の奥行きの変化等に共通性が見られ、又小さな sand wave 及び海岸 undulation の活潑な変化によって大規模なものの変化が生じている点等にも類似性が見られる。

第5図 波状海岸線及び sand wave の移動変形の様式。格子状に示した区域は侵蝕、点で示した区域は堆積を示す。

以上の様な類似性から、筆者は両者の形成機構に、かなり接近したものと予想する。

両者の相異は、単に一方が海底面に対し垂直断面内にあり、他方が海岸に対し水平断面内にあるだけである。そしてその場合、水の流動方向や砂の運動方向は、上部水層の厚薄の相異により、一方が垂直断面内に生じ得るに対し他方が水平断面内にしか生じ得ない所からくるもので水や砂の運動方向とこれら地形との関係には、全く相異がない。以上の観点から考えると、両者の形成機構の原理にも、特に根本的な相異を見出せない様に思われる。

4. 類似性から考えられる両者の形成機構について

上の観点から両者の形成機構を再検討する。

a. 海岸の rhythmic pattern

海岸の undulation については、従来主として碎波による swash とこれから生ずる rip current によって説明¹⁷⁾した。然しこの説明は彎入部の形成を説明しても、これらの彎入部が連続して発達する rhythmic pattern の説明にはなっていない。King¹⁸⁾は連続した円弧状 bar を説明する為、多方向からの波を考えたが、これも rhythmic pattern の説明としては困難である。また鮮干 (1963) は前述したように、浅海底に多数の溝を想定し、海岸の undulation をこのあらわれと解釈したが、この説明も rhythmic pattern を説明するためには、多くの困難な問題をかかえている。

海岸の undulation を sand wave と同じ様に解釈したらどうであろうか。Cornish (1934) や Kuenen (1950) は, ripple mark や sand wave の成因を vortex の作用に帰している。すなわち海底に突起部があると、その下流側に vortex が形成され、海底の砂はけずられて突起部に運ばれて crest を作る。vortex の他端にも vortex の作用により砂が堆積して、次の crest に発達する。このような発達過程を経て海底の rhythmic pattern の形成が達成されると説明している。Bagnold (1954) は砂粒の軌道距離によって ripple の波長を説明しているが、これも vortex の上面の軌道に相当するから、本質的な相異はないであろう。

今海底近くの水の流動を、海岸の沿岸流におきかえて見ると、ここにも当然同じ現象が起ってもいいはずである。即ちこの沿岸流を遮断するような海岸の突起部があると、その下流側には環流が形成されるであろう。その為環流の中央部に位置する海岸では砂浜がけずられ突起部に堆積される。一方突起部の砂の一部は、沖側 current に沿って運ばれ、環流の他端に堆積される為、ここに第2の cusp 状岬が現れ、更にその下流側に環流が形成される。この様にして次々に cusp 状岬が形成され、rhythmic pattern を生ずる。このような説明でも比較的矛盾なく rhythmic pattern の説明が出来る様に思われる。然し筆者はこれだけで満足な説明

が与えられているとは思わない。筆者は寧ろ沿岸流が遮断された時に生ずる沿岸流の蛇行に根本的な原因がある様に思う。1962 年筆者は神奈川県二宮海岸において、沿岸流の観測を実施し、その結果海岸線の rhythm と一致した沿岸流の蛇行を知った。詳細な報告は他の機会にゆずるが、この様な沿岸流の蛇行が海岸 rhythm の原因となったと推測するのである。

第6図 沿岸流の蛇行による波状海岸線の形成過程を示す。

上：海岸突起物により下流側に沿岸流の蛇行流路が生じ環流が形成される。

下：環流の作用により波状海岸線が形成される。

即ち沿岸流が、何らかの障害物によって遮断されると、恰も河流が蛇行を起すと同じ様に、その下流部に蛇行流路が生ずるであろう。蛇行流路の発生及び蛇行帯の大きさには、この他に沿岸流の巾や流速が重要な因子として関与すると思われる。この様にして蛇行流路が発生すると、蛇行流路の内側(陸側)には、その腹の部分に環流が形成される。この環流の作用により、その中心部の海岸線はけずられて彎入し、一方の端では堆積が生じて cusp 状岬が形成されるであろう。cusp 状岬の一部の砂が環流の外側に沿って運ばれて、他端の cusp 状岬に堆積される事は先の説明と同様である。

以上のような機構により海岸 undulation の rhythmic は説明される。然し海岸の場合、これに直ちに swash の影響が加わる事は確かである。従って海岸における rhythmic topography が完成される為には、実に多くの過程を経なければならないであろう。

b. 海底の rhythmic pattern

海岸 undulation との類似性から、sand wave の形成機構についての暗示はないであろうか。

17) 前掲 2), 4) 等

18) King, C. A. M. (1959) : Beaches and Coasts

sand wave の発達が生道の入口砂州に見られる事実や、その種々の大きさの原因等については、未だよく分っていない。その直接の作用が vortex であるとしても、それだけでこれらの問題を説明する事は出来ないのである。

sand wave と海岸の undulation とが、単に方向を異にしたものに過ぎないとすれば、当然海岸に見られた様な沿岸流路の蛇行が、海底面に沿って垂直断面内に生じてよいであろう。

この様な流れの波動は、内部波とか、或は急流端に形成される跳水現象等として知られている。恐らく sand wave の直接の原因となる vortex は、この様な流れの波動に関連して形成されるものに違いない。この様なものを考える事によって、sand wave の大きさや分布が、比較的矛盾なく説明できる様に思われる。

結 語

海岸及び海底に見られる rhythmic pattern の類似性から、筆者はこれらの地形の成因を、流れの内部波動という 1 つの原理によって、説明し得る事を述べた。一見異った作用に見える複雑な自然現象を、単純な法則により統合、説明する事は、自然科学の本来の行き方である。

然しここに提出された筆者の仮説は、今後に残された多くの未解決の問題を抱えている。

その第 1 は、海岸付近における沿岸流の蛇行

及び海底面近くの流れの波動に関するものである。今日これに関する実験、観測資料は甚だ乏しい。

第 2 は rhythmic pattern の分布に関する問題である。rhythmic pattern の特に顕著な発達地域の存在が知られているが、これらの分布をこの仮説によって説明する事が、当面の課題である。

第 3 は、海岸における rhythmic pattern の発達過程の問題である。沿岸流の蛇行とこれから派生する環流によって作られる地形は、波状海岸線の端緒に過ぎない。砂浜海岸の rhythmic topography の形成は、更にこれに引続く多くの形成過程を経なければならない。即ち海底侵蝕帯の形成、向岸流及び離岸流の発生、更に円弧状 bar の形成等の一連の現象が生ずる。これらの発達過程及び移動、変形現象の説明は次の機会に述べる積りである。

第 4 は海岸及び海底の各々において、数種の規模の rhythmic pattern の存在が知られた。これら相互の間の関係に関係するものである。例えば数 100m の波長の海岸 undulation を、筆者の仮説により説明したとしても、規模の小さい beach cusp の問題を、同様に扱ってよいであろうか。

以上の様な問題を解決した上で、この仮説は承認されるであろう。

Rhythmic Landforms seen in the Beach Areas and Offshore Sea Bottom

Akio MOGI

Recently, rhythmic land forms such as shoreline waves, rhythmic system of arcuate bars, and the meandering of the longshore current along beaches have been pointed out by means of accurate hydrographic survey and aerial photographic interpretation. On the other hand, rhythmic patterns on the sea bottom such as sand waves are found in the areas with strong current and sandy bottom.

The author recognized some resemblances in the configurations, composing materials and their movements between the shoreline undulations and sand waves. On the offshore bottom with the more depth, the water and the sand particles are able to move vertically to the sea bottom. While, on the nearshore bottom with little depth, the water and the sand particles are able to move horizontally to the shoreline. Both the shoreline undulations and submarine sand waves are facing the cape like cusp or crest perpendicular to the direction of the nearshore and offshore currents. Accordingly, the relations between movements of water and sand particles and these rhythmic topographies are very close to each other.

From these reasons the author assumed that there is a similar mechanism on the origin of the both rhythmic topographies.

He, then, presented hypothesis that the shoreline undulation and submarine sand wave were formed by the water circulations or vortices resulted from the meandering of currents caused by the occasional disturbance of currents.