

水工学シリーズ02-B-3

漂砂に起因する災害の予測手法とその問題点

大阪大学大学院工学研究科 教授

出口 一郎

土木学会
海岸工学委員会・水理委員会
2002年9月

漂砂に起因する災害の予測手法と問題点

Disasters Caused by Sediment movement – Prediction and Points at Issue to be solved -

出口 一郎

Deguchi Ichiro

1. まえがき

漂砂災害の予測手法とその問題点を考える。そのためには、まず漂砂災害とはどのような災害かを定義する必要がある。ここでは、まず日本の沿岸域の現状と、沿岸域災害について述べる。ついで、その中での漂砂災害の特徴、侵食及び堆積によって引き起こされる災害とその機構について述べ、最後にそれらを予測する場合の問題点について考える。

2. 日本の沿岸域の現状と沿岸域災害

わが国の沿岸域は、古くからその高度利用のために継続的な開発を余儀なくされてきた。特に、第2次世界大戦後の急速な経済発展を支えるために、食糧増産あるいは工業立地を目的とした大規模な沿岸域の開発が行われ、多くの自然海浜が消失した。このような開発に伴ない社会経済活動が沿岸域へと拡大しつつあった時期に、伊勢湾台風、第2室戸台風等の被害に代表されるいくつかの致命的な大きな海岸災害が発生した。その結果に基づいて災害対策基本法が制定され、同時に防災機能を最優先した防災構造物が施工されてきた。

このような防災構造物の建設が人々と海との分離・乖離を加速し、パブリックアクセスが極端に減少した。また、1つの防災機能を優先することによって、他の災害を引き起こす例も報告されている。

大都市周辺の沿岸域では、我々の社会経済活動を維持、発展させるために様々な開発行為が現在も継続して進められている。一方では、開発によって失われた自然海岸環境の回復に対する要求、あるいは開発された後に現在は放置されている低・未利用地の有効利用に関する関心が高まっている。

都市が要求する開発行為と沿岸域が共生していくためには、それら開発行為が、都市にとっては安全かつ快適であるという条件を満足した上での利便性をもたらすものでなくてはならず、沿岸域にとっては、それが持つ機能（資源・サービスの提供、同化）の消滅を最小限にとどめるものでなければならない。そのために環境容量の減少を環境質の向上で補うことを目的とした、すでに失われた自然海浜環境を回復を目的とした様々な様式の海岸構造物が考案され、各地で建設されている。人工干潟、人工海浜、緩傾斜護岸や、各種親水性施設がそれである。このようないわゆる親水性施設の建設によってパブリックアクセスは増大する。しかし、パブリックアクセスの増大に伴って、海岸での事故に遭遇する確率も高くなり、新たな防災処置を考える必要が出てきている。

このような背景の下、海岸法が改定された。改定前の海岸法の目的は、「津波、高潮、波浪その他海水又は地盤の変動による災害から海岸を防御し、もって国土の保全に資すること」であり、この目的を達成するために都道府県知事によって、防御すべき海岸に係わる一定の区域を海岸保全区域として指定される。海岸保全計画の手引きに記述されている海岸保全の目的は「高潮、津波、波浪侵食などによる災害から海岸及びその背後地を防御するとともに、良好な海岸環境の適切な保全、創出を図ること」である。

改正海岸法では、総合的な視点に立った海岸の管理を行うため、旧海岸法の目的である「海岸の防御」に、「海岸環境の整備と保全」及び「公衆の海岸の適正な利用の確保」が新たに目的として加えられた。

一方、災害対策基本法による災害の定義は「暴風・豪雨・豪雪・洪水・高潮・地震・津波・噴火その他の異常な自然現象、または大規模な火事若しくは爆発その他その及ばず被害の程度においてこれらに類する政令で定める原因によりにより発生する被害」である。

海岸保全計画の手引きでは波浪侵食は災害に含められているが、災害対策基本法では、海岸にかかわる災害の中に特に侵食災害は定められておらず、その他の異常な自然現象の含められている。また、改正海岸法では海岸環境の保全あるいは適正な利用の確保が目的に加えられたことから、それらが損なわれるような事態、環境災害（破壊）あるいは適正な利用に支障をきたすような事態も災害の範疇に加える必要があるのかもしれない。そうすると、人命の損失、社会資本ストックの損失、社会経済活動の障害による外部不経済、環境質の低下、環境容量の減少、・・・これらは全て災害ということになる。

以下で、まず漂砂移動によって引き起こされる災害の特徴と原因について述べ、ついでその予測手法と問題点について述べる。

3. 漂砂災害の2つの特徴

津波は、一瞬にして多くの人命を奪い、我々の社会経済活動に重大な支障を来すような被害をもたらす。高潮による浸水によっても、甚大な被害を受けてきた。また高波によっても越波や強大な波力により社会的な損失を被っている。この多くは、我々の社会経済活動の場に海水が浸入してくること、あるいは強大な波の力によって構造物の機能が喪失したりすることによって発生するものであり、多くは災害を引き起こした外力を特定できるものである。例えば、北海道南西沖地震津波による災害、あるいは伊勢湾台風による災害というような呼び方が行われている。

この様な災害には、それが発生する閾値があり、外力がその限界値を超えると災害となる（たとえば、高潮の場合は、高潮堤防の天端高が閾値となり、天端高さをこえる高潮が来襲すると、浸水などの被害が発生する）。本来は、どの程度の外力まで守るのかという防災基準としての外力より、防災構造物の設計基準となる外力のほうが大きくとる必要があると考えられるが、通常は、計画潮位、計画波高、といった設計基準を防災基準としている場合が多い。

一方、海岸では様々な外力によって海底砂の移動が引き起こされる。海底砂が移動するかどうかの閾値は移動限界ということで様々な研究が行われている。外力がこの閾値を超えると海底砂は移動するが、災害にはつながらない。通常海象条件では常に海底砂は移動している。その積分値として海浜変形が生ずる。したがって、津波や高潮や高波浪による災害のように、災害を発生させる条件を特定して、それを設計条件とすることも容易ではない。これが、漂砂災害の特徴の1つである。

さらに、本来砂浜の幅はどの程度あるべきかということについては、局所的な海岸の条件（来襲波などの自然環境、海浜および背後地の利用状況、防御施設、など）に大きく依存し、一定の基準を設けることができない。しかし、それぞれの海岸では、海岸災害から国民の生命・財産を守るための最低限必要とされる国土の海側境界として「計画防御線」が設定され、その沖側に砂浜が存在する場合は、高潮対策計画における堤防天端高さを決定するために「計画汀線」が設定されている。すなわち、砂浜が存在することを前提として、さまざまな防災構造物が建設されているわけである。この計画汀線を確保できる浜幅が災害の発生に対する1つの閾値と考えることもできる。

図－1は、先に述べた海浜変形の各種時間スケールを考慮して土砂収支のとれていない（侵食が継続して進行する）海岸における汀線位置を模式的に示したものである。汀線の変動は、気象擾乱によって引き起こされる入射波浪特性の変化に対応して前進・後退を繰り返しながら平均的に後退する。この中には来襲波の季節変動に対応した変動も含まれ、異常な高波浪が来襲すれば、それによって非可逆的な汀線後退が生ずる。図中には、先に述べた「計画汀線」（災害発生の閾値）に対応する許容される汀線の後退量も点線で示して

ある。

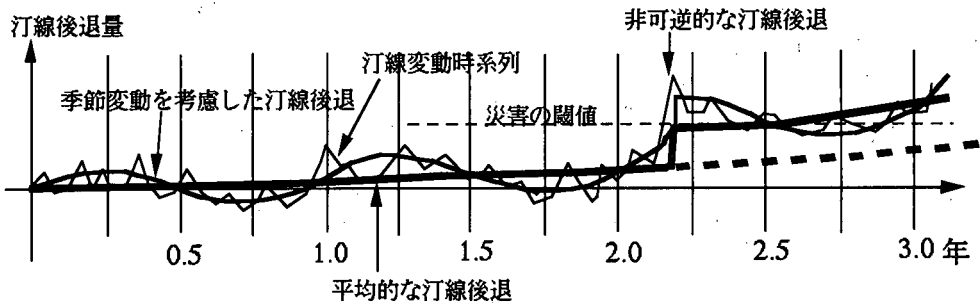


図-1 侵食域での汀線変動時系列の模式図

高波浪の来襲によって一時的に許容される後退量以上の汀線後退が生じて、やがては以前の汀線位置まで回復する。しかし時として汀線が後退したままで回復せずに残留変位が生ずると、高潮による浸水、越波などの災害が生じたり、局所洗堀や堤脚水深の増加に伴う波力の増大などによる護岸・海岸堤防の被災が発生する。これらの災害が発生するまでに砂浜が回復すれば、災害は発生しない。結果として、漂砂災害の閾値は、津波、高潮あるいは高波による災害の閾値のような明確な形で設定することができない。これが、もう1つの特徴である。

4. 侵食による災害

わが国における平均的な年間侵食量（砂浜消失量）は、160ha/year にのぼるといわれている（田中，1993）。このような海岸侵食によって引き起こされる問題点を列挙すると以下の通りである。

汀線後退，砂浜の消失による国土の減少：資産としての国土の減少，島嶼の消失に伴う経済水域の減少，水産業等の生産の場の減少，など

海岸防災能力の低下：砂浜自体の防災能力（透水性による波高減衰，遡上高さ制御），構造物の前面水深の増加と，それに伴う構造物への入射波高の増大，など

海岸環境（景観）の劣化・消失：「白砂青松」を構成する要素の減少，文化的・歴史的景観の消失，潮干狩り，海水浴等のレクリエーションの場の減少，など

生態系への影響：藻場面積の縮小に伴う生態系の変化，砂質海底に生息する底棲魚介類の減少，など

わが国の砂浜海岸における海岸侵食の種類と原因及び対策については、河田（1988）あるいは宇多（1997）の詳細な解説がある。それらも考慮して、海岸侵食の種類と原因について、述べておく。

海岸侵食は、沿岸漂砂と岸沖漂砂いずれによっても引き起こされる。図-2は、沿岸方向に2つの岬によって遮蔽された海岸における漂砂移動と海浜変形を模式的に示したものである。図中斜線で囲まれた領域には、海崖からの土砂供給（A）、河川からの土砂供給（B）が存在し、様々な波浪条件に対応した沿岸漂砂（C）及び岸沖漂砂が存在している。このとき、荒天時には漂砂帯の幅が広がり、離岸方向漂砂により時として漂砂帯を越えて沖側に漂砂が輸送される（b）。岬に沿う離岸流によって漂砂帯の沖に輸送される漂砂も考えられる（a）。このような深い領域に輸送された漂砂は、通常時波浪における漂砂帯より沖側に堆積し、波浪によって移動する漂砂システムの外側にでてしまい、波浪以外の外力によって輸送される（D）。

この海浜が平均的にほぼ侵食も堆積も示さない状態にあるとする。このときは、対象とする領域へ流入する土砂量（（A）と（B））と流出する土砂量（（a）と（b））は量的に釣り合っている。すなわち、荒天時の沿岸漂砂と離岸漂砂によって後退した汀線は、通常波浪に戻ると再び回復し、平均的には前進も後退も生じない。このとき、対象とする海岸の漂砂移動システムは開いているが、システム内での土砂収支は閉じている。

一方、対象とする海岸に供給される土砂が無く ($A=B=0$)、漂砂帯より沖側に流出する土砂もない ($a=b=0$) 場合にも、平均的な水深の変化 (汀線の前退・後退) は生じない。このときは対象海岸における漂砂移動のシステム自体が閉じたものとなっている。

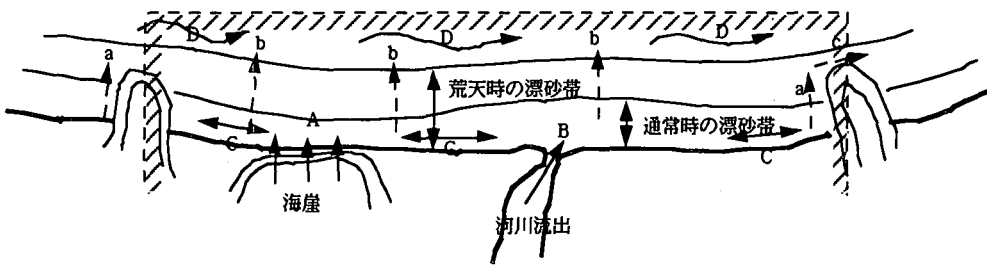


図-2 沿岸方向に閉じた領域における漂砂移動と海浜変形

沿岸方向に両端の開いた海域は、本質的には開いた漂砂移動システムである。そこでの土砂収支が閉じているかどうかは、図-2 に示した漂砂移動以外に、領域両端での沿岸漂砂の出入りも考慮する必要がある。

漂砂移動システムは開いているが土砂収支の閉じた海岸で、海崖の侵食防止工が施工されたり、河川改修あるいはダム建設により河川からの流出土砂が減少すると、海域への流入・出の量的なバランスが崩れて侵食 (平均的な水深の増加や汀線の後退) が生ずる。このような侵食を阻止するためには、システムから外への漂砂移動を制御するか、土砂収支がとれるだけの漂砂を人為的に供給する必要がある。

漂砂システムの沖側に土砂を輸送する要因として次の2つが考えられる。1つは異常な高波浪来襲時に生ずる浮遊状態での離岸方向漂砂移動である。高波浪によって巻き上げられた浮遊漂砂は、通常時の漂砂帯のはるかに沖まで輸送され堆積し、再び漂砂システムの中に戻ることはない。これによって汀線の位置に非可逆的な残留変形が生ずる。図-3は岸沖漂砂によって生ずる非可逆的な海浜断面変形を模式的に示したものである。このような漂砂移動によって生ずる侵食を制御するためには、漂砂システムの沖側まで漂砂を輸送するような異常な高波浪を制御し、その強大な波力が直接浅海域の海底に作用しないようにする必要がある。

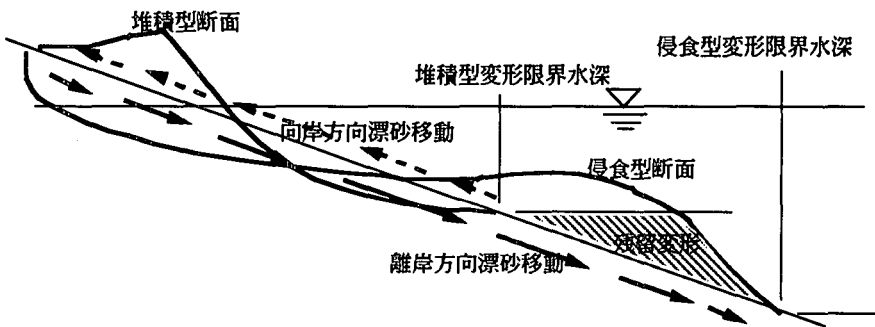


図-3 岸沖漂砂によって生ずる非可逆的な海浜断面変形

もう1つの要因は、沿岸方向に輸送されてきた漂砂の海底谷への流出あるいは構造物や岬に沿って発達する離岸流による沖側への流出である。このような流出を防止するには、漂砂の輸送流れ、あるいは漂砂移動自体を制御する必要がある。

漂砂システムが閉じている海岸において、その中に海岸構造物を建設すると、沿岸方向の漂砂移動が構造物の位置で阻止され、漂砂の下手側に供給されずそこで侵食が生ずる。構造物建設によって入射波浪特性、海浜流場も強制的に変化させられることもこのような侵食を助長する。このとき、構造物の漂砂上手側には堆積が生ずる。堆積が平均的な漂砂帯内で起こる限りは、波向きが変化することによって逆方向の沿岸漂砂

移動が生じた場合には、侵食域と堆積域は逆転する（汀線変動の可逆性）。閉じた漂砂移動システムを持つ海岸では、構造物の漂砂上手側及び下手側に2つの閉じた漂砂移動システムを持つ海岸ができることになる（図-4）。

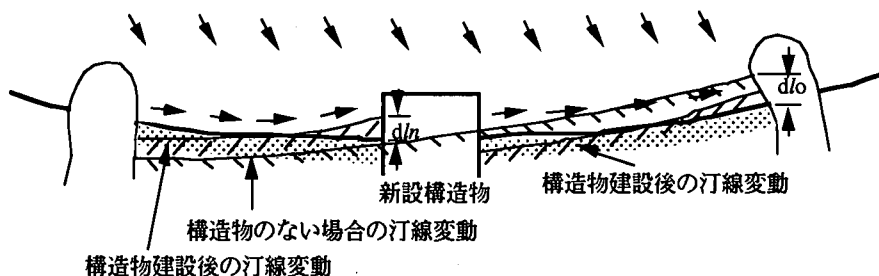


図-4 漂砂移動システムが閉じた海岸における沿岸漂砂と海浜変形

このときの海岸端部における汀線変動振幅 dln は、構造物がない場合の汀線変動振幅 dlo よりも小さい。しかし、構造物に沿って発生する離岸流によって漂砂帯を越えて沖側に輸送され堆積するような場合は、漂砂移動システムは閉じず、平均的にみて水深は増大（汀線は後退）する。この場合も漂砂帯を越えて沖側に流出する漂砂移動を制御し、閉じた漂砂移動システムに戻す必要がある。漂砂移動システムが閉じていれば、沿岸漂砂が卓越した方向を持つ場合においても汀線変動はやがて平衡状態に近づく。

一方、漂砂移動システムが閉じず、卓越した沿岸漂砂の移動方向が存在する状態で土砂収支が閉じた海岸（ $Q_{in}=Q_{out}$ ）に構造物を建設した場合は、一方的な汀線後退が生ずる（図-5）。このとき、護岸が建設されていることなどの理由で十分な砂浜の幅が無い場合はこの侵食が加速され、時として広範な領域で護岸の被災が生ずる可能性がある。また、被災が生じなくても、護岸前面の前浜が消失することにより、越波量の増大を引き起こす可能性もある。この点が漂砂移動システムが閉じた海岸と大きく異なる点である。

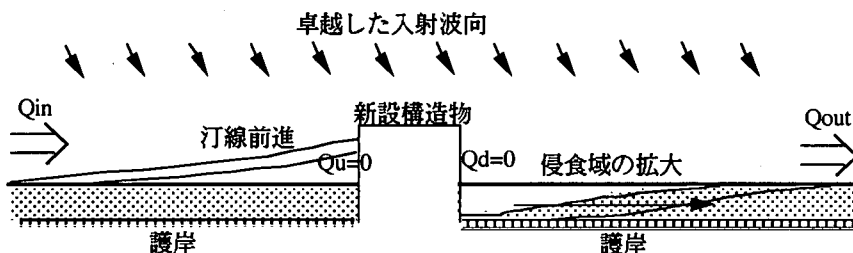


図-5 漂砂移動システムが閉じていない海岸の沿岸漂砂と海浜変形

このような侵食に対処する方法として、沿岸漂砂上手堆積域から下手侵食域への砂のバイパス（ $Q_d \rightarrow Q_{out}$ ）あるいは構造物によって流下する沿岸漂砂を制御し Q_{out} を低減（ $Q_{out} \rightarrow 0$ ）させることが考えられる。前者の場合、流下する沿岸漂砂量に等しい量の砂をバイパスできれば侵食は防止できる。構造物による漂砂制御を行ない沿岸漂砂を制御すると、その下流域でまた侵食が生ずる。このような場合は、有限な領域で漂砂移動制御を行うことによって侵食を完全に防止することは不可能である。したがって、構造物の漂砂下手側で沿岸漂砂量が急激な勾配を持たないような漂砂制御を行い、最大侵食量を緩和することを目的とするべきである。河川の流路変更も従来の漂砂移動のバランスを崩し、侵食をもたらす原因となる。

ここで示したように、海浜地形は、広範な領域における微妙な漂砂移動のバランスの結果、様々に変化する。したがって1カ所で大きな汀線後退が生じたからといって侵食箇所だけに局所的な対応をするのではなく、侵食箇所を含む十分に広い範囲の漂砂システムの中で、対策を考えなければならない。漂砂災害の予測を行う場合も、対象領域を含む広範域の漂砂システムが十分に再現できるような方法で予測する必要がある。

一方、構造物のごく近傍で生ずる問題として、局所洗掘がある。構造物近傍では、一般に流れが加速されたり重複波が形成されることによって、しばしば局所的な洗掘が生ずる。局所洗掘が生ずると構造物前面水深が増加し、構造物への作用波力を増大させたり構造物自体の安全性を損なう場合がある。また、時として構造物の沈下が生ずるが、沈下が生じた場合は、天端高が低下することによりその機能が低下する。防波堤あるいは海岸護岸前面と、構造物端部の深掘れが典型的な局所洗掘である。構造物前面で生ずる局所洗掘の原因は、そこで形成される重複波の質裏輸送（例えば入江ら,1984）や法面からの戻り流れ（例えば樫木ら,1972）による局所的な離岸方向漂砂移動、あるいは構造物に斜めに波が入射することによって発生する沿い流れによる漂砂移動であると言われている。特に碎波帯内で汀線に平行に設置された護岸前面では、波が斜め入射することにより自然海浜で発生する沿岸流よりも早い沿岸流が発生する場合がある（出口,1984）。このような局所洗掘を防止するためには、反射率あるいは戻り流れを低減させるような構造形式にする必要がある。

また、構造物端部での局所洗掘の原因は構造物周辺で局所的に加速される流れや構造物に沿う下降流である。潮流による橋脚周辺の洗掘、円柱構造物周辺の洗掘がその代表で、耐侵食性を高めるためには、これらの流れを制御するか、加速される領域の海底を被覆し、移動に対する限界流速を大きくする必要がある。

5. 堆積による災害

堆積することによる災害もある。代表が河口閉塞である。河口が閉塞した後に降雨に伴う流出量の増加があった場合、砂州がフラッシュされないと河川の水位上昇により浸水被害が発生することになる。フラッシュされるかどうかは、形成された河口砂洲の規模、洪水のハイドログラフ、波浪の有無などに依存する。

しかし、洪水に対する流水断面が確保されるような形で常に存在している砂州もある。このような砂州が消滅すると、砂州が存在することによって吸収されていた波浪エネルギーが直接護岸などに作用することになり、越波、護岸の被災などが生ずることもある。砂州の消滅は、河川流によるフラッシュ以外に、河口周辺での土砂採取、河口部への沿岸漂砂供給量の減少、などによっても生ずる（図-6）。

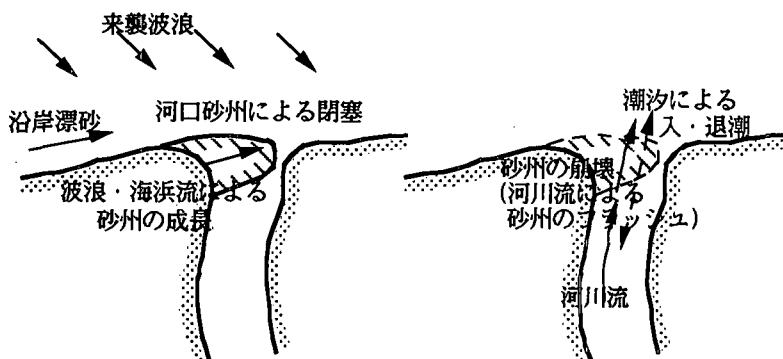


図-6 河口砂洲の形成と消長の模式図

もう1つは、港湾や航路の埋没である。漂砂の堆積によって航路の埋没や港湾内の水深減少が生ずると、航行障害や係留荷役に障害をきたし、社会的な不利益をもたらす。

波と流れによって生ずる漂砂移動によって形成されてきた海底地形に、人為的に一部を増深することによって航路を建設すると、空間的な漂砂移動の非平衡性が作り出される。このような非平衡性によって航路の埋没が生ずる（図-7）。

歴史の古い東南アジアの諸港湾の多く（タイのバンコク港、インドネシアのバンジャルマシン、ベトナムのサイゴン、ハイフォン港、など）は、いわゆる河口港であるため、一般に浅海域に長大な航路が建設され

ているが、このような航路においては、埋没対策として定常的な水深維持浚渫を余儀なくされている。

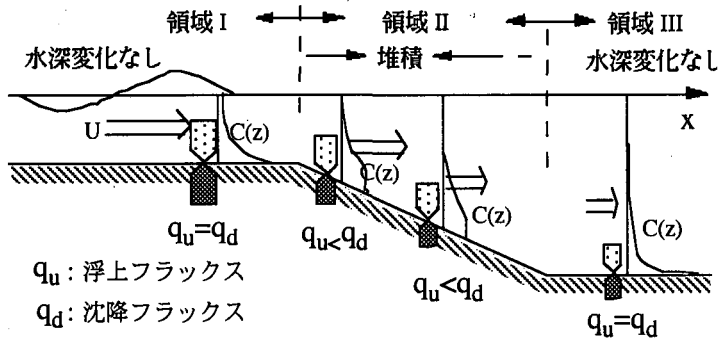


図-7 非平衡状態の浮遊砂による航路埋没の模式図

これに対して、港湾埋没は、少し複雑である。1 つは、河口砂州同様、港口が漂砂の堆積によって塞がれる場合、もう 1 つは、港内に砂が持ち込まれ、そこに堆積する場合である。前者は、通常の漂砂移動で説明可能であるが、後者を説明するためには、港口から港内に浮遊砂を持ち込む水粒子運動の軌道長の長い流体運動や、防波堤を越波する際に同時に底質も持ち込む越砂といった特殊な状況を考える必要がある (図-8)。

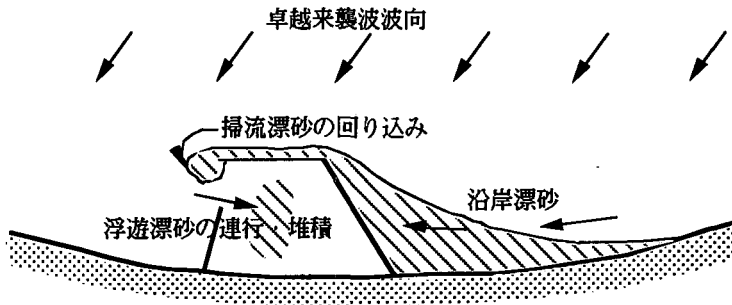


図-8 港湾埋没の模式図

6. 災害の予測手法と問題点

最後に、漂砂災害の予測手法と問題点について述べる。この場合の予測の目的は、対象とする期間内で

①現況のままで漂砂災害が発生する可能性はあるのか、発生するのはどのような状況か

・・・漂砂災害の定義と発生機構及び外力の条件

②発生した場合耐えることができるのか、どこまでなら大丈夫なのか

・・・災害の閾値の問題、閾値を超えた場合の対応 (構造物の補強、養浜)

であろう。対象とする期間は様々であろうが、通常数年以上に及ぶ長期間の平均的な変動過程での漂砂災害予測と、発生頻度が 1 年に数回程度の比較的高波浪あるいは、設計波高に対応するような高波浪に対する予測である。

海浜変形の予測手法については、すでに夏期研修会でも過去何回かテーマに取り上げられており、水深変化モデル、等深浅位置変化モデル、ハイブリッド・モデル、など、様々な数値予測モデルが提案され、現地海岸の変動予測に適用されている (例えば、清水, 2000, 高木, 2001)。基本的にはそれらを使えば良い。

移動床模型実験も漂砂災害の発生する可能性を検討する際の有効な手段で、数値予測では得られない重要な情報を得ることができる。しかし、相似性やコストパフォーマンスの問題から、最近では数値的に海浜変形予測が行われることが多い。ここでは、(1) 長期間にわたる平均的な海浜変形過程における漂砂災害、

(2) 高波浪時に短期間に生ずる漂砂災害, (3) 航路港湾埋没問題, (4) 河口閉塞について, 主として数値的に予測する場合の問題点について述べる。

(1) 長期間にわたる平均的な海浜変形過程における漂砂災害の予測手法と問題点

通常, 長期間に涉って平均的に進行する海浜変形に対しては, いわゆる全沿岸漂砂による等深線変化予測モデルによって予測される。対象となる波浪は, 沿岸漂砂量は入射波浪エネルギーフラックスに比例することから, 年間を通じてのエネルギー平均波(季節的に卓越する入射波浪エネルギーの方向が明らかに異なる場合は, それぞれの方向を代表する2つのエネルギー平均波)であろう。当然, 岸沖方向漂砂移動による海浜断面形状の変化(汀線位置変化)は無視されるが, これ以外に, 以下のような問題点がある。

・全沿岸漂砂量に及ぼす構造物の影響の評価

入射波浪の砕波点におけるエネルギーフラックス(砕波波高, 水深, 砕波角)の関数として推定されることから, 砕波帯内に構造物が設置された場合の構造物の影響は, 沿岸漂砂の補足率のような形でしか評価されない。さらに, 構造物周辺では砕波角から設定される沿岸漂砂の移動方向と, 海浜流から推定される沿岸漂砂の移動方向が必ずしも一致しない。この様な場合は, 局所沿岸漂砂量を計算してその岸沖方向積分値として全沿岸漂砂量あるいは補足率を求める必要がある(樫木・出口, 1982)。

・全沿岸漂砂量の推定に, 底質粒径依存性を考慮する場合の評価方法

対象海域の底質粒径を考慮して全沿岸漂砂量を推定しようとする場合, 海底がほぼ均一な粒度分布を持つ底質で構成される場合は, 代表粒径を用いれば問題はない。しかし, 広い粒度分布を持つ底質によって構成される場合は, 粒径の大きさによって移動形態が異なる可能性もあることから, この様な場合の沿岸漂砂量推定方法は, 残された問題点である。

(2) 高波浪時に短期間に生ずる漂砂災害予測手法と問題点

この場合は, 当然沿岸漂砂による海浜変形と岸沖漂砂による断面変形を考慮する必要がある。この様な状態での海浜変形の予測は, 水深変化モデルが用いられるが, すでに指摘されているとおり, いわゆる打ち上げ波帯での局所漂砂量を正確に推定する方法がないため, 汀線変動まで精度良く予測するまでにはいたっていない。この問題点を解決するため, 汀線変化予測モデルと水深変化モデルを組み合わせたハイブリッドモデルも提案されている(清水ら, 1995)が, 汀線位置の変化予測は汀線変化予測モデルで行われる。一方, 高波浪入射時に発生する離岸方向漂砂移動によって引き起こされる断面変形(汀線後退)についても, それを予測するモデルがいくつか提案されている。

このときの問題点は, 以下のようなものである。

・対象波浪継続時間

極値統計の理論から, 1年に数回の頻度で発生する波浪あるいは設計波(例えば30年確率波)に対する波高と周期, 場合によっては波向は与えられる場合が多い。しかし, その継続時間については, 統計資料は無い場合が多い。この様な高波浪は, 通常台風あるいは低気圧の通過によって引き起こされる。海浜変形は, 時々刻々進行する変形量の積分値として現れる。したがって, 瞬間最大値の波高, 周期だけではなく, それを含む高波浪継続時間の方も重要なパラメータとなる。これを全沿岸漂砂量を決定する入射波浪エネルギーという観点から考える。図-9は, 高知海岸でここ十数間に実測された, 台風によって引き起こされた高波浪の波高時間変化で, 図-10はそれぞれの高波浪時系列から波高測定点における入射波浪エネルギーフラックス(Ecg, E:エネルギー密度, Cg:群速度)の累積値の時間変化を示したものである(国土交通省, 高知工事事務所, 2002)。累積エネルギーフラックスは, 全沿岸漂砂の移動量に関係する量である。図-9より, 最大波高は, 1991年9月の台風によって発生している。しかし, 累積エネルギーフラックスが最大となるのは, 最大波高は高々5mではあるが, 波高2m以上の高波浪の継続時間の長い2001年8月の波浪である。この場合, 後者の方が大量の沿岸漂砂が移動し, 大きな海浜変形が生じた可能性がある。

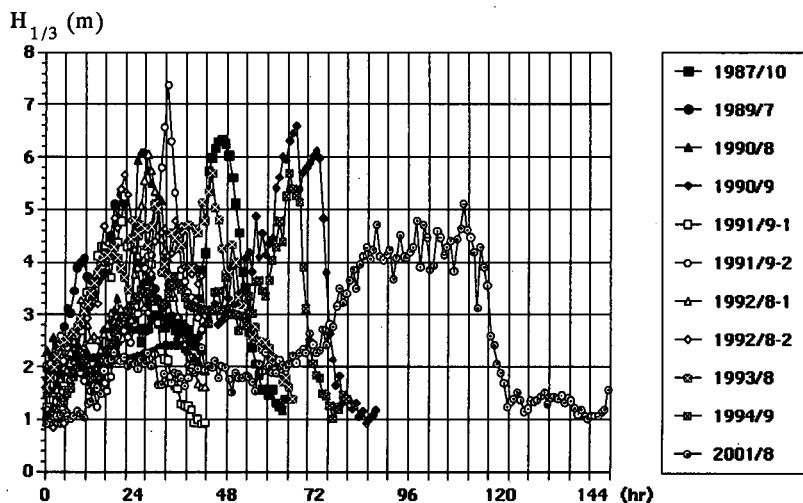


図-9 高知海岸での台風による高波浪の波高時系列

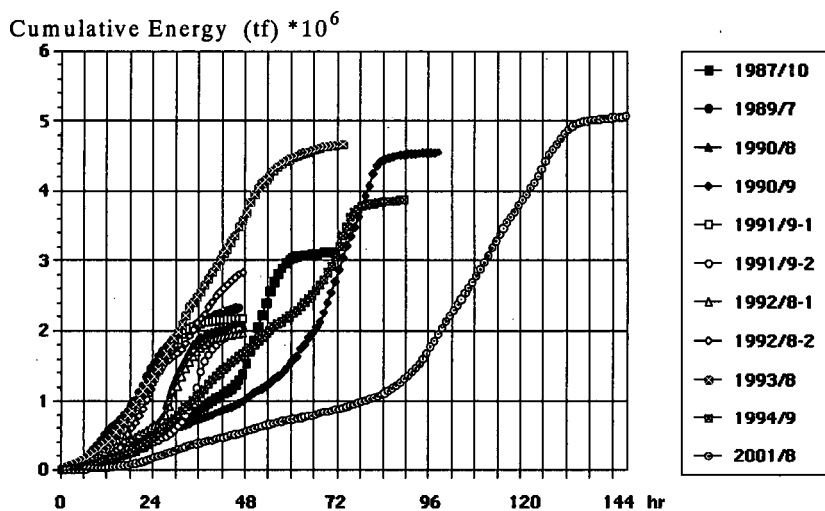


図-10 高知海岸での台風による高波浪の累積エネルギーフラックス

・入射波浪の不規則性の影響

先に述べた離岸方向漂砂移動による断面変形予測モデルの多くは、規則波を対象としたものであり、規則波を用いた実験結果に基づいて再現性の検討が行われている。例えば、2次元水槽内で傾斜海滨の断面変形実験を行った場合、不規則波を入射させた場合と、その不規則波の有義波あるいは平均波に対応する規則波を作用させた場合、結果として生ずる断面変形には有意な差違を生ずることが知られている（例えば、大塚ら, 1984）。

図-11は、初期勾配 1/20 の模型海滨に波高 15cm, 周期 1.4s の規則波を2時間入射させた場合の断面形状と、平均波高の諸元及び有義波の諸元が規則波の諸元にほぼ一致する Bretschneider・光易型スペクトルを有する不規則波を2時間作用させた場合の断面形状を比較したものである（浦南, 2000）。

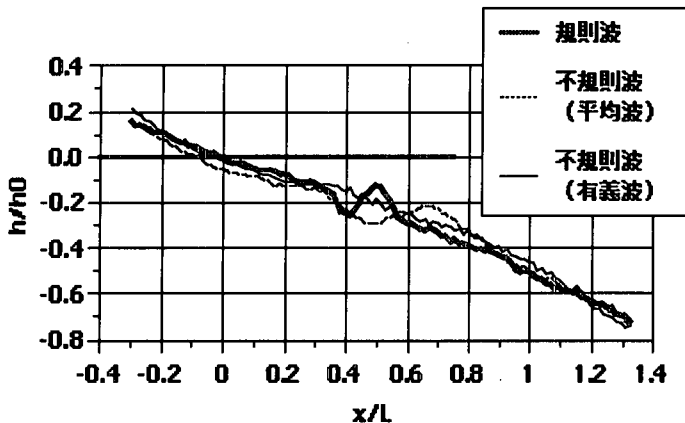


図-1 1 規則波と不規則波によって生ずる断面変形の差違

不規則波によって生じた海浜断面変形は、規則波で再現されないのと同様、規則波によって生じた海浜断面形状は、不規則波によって再現することも困難である。したがって、当然汀線変化量も、規則波実験と不規則波実験で差違が生ずる。

スペクトル形状あるいは波群構造の異なる不規則波を入射させた場合においても、流体運動の波群に拘束された長周期変動成分が異なることから、図-1 1 と異なった地形が形成される可能性もある。平面実験においても規則波と不規則波によって形成される地形に有意な差違が生ずることが示されている（西ら、1987）

実験で生ずるこの様な規則波と不規則波による海浜断面変形の差違は、いわゆる断面変形予測モデルで数値的に予測することは不可能に近いと思われる。したがって、現地で離岸方向漂砂移動によって生ずるであろう汀線後退量を、実験にしろ数値予測にしろ予測するには非常な困難を伴う。加藤ら（1987）は、実測された汀線変動及び入射波エネルギーフラックスから、短期間に生ずる汀線変動を予測する方法を提案している。高波浪時の汀線後退量をこの方法によって推定する場合にも、前述した高波浪時を含む入射波諸元の時系列が必要となる。

（3）航路・港湾埋没予測手法と問題点

航路埋没については、漂砂（特に浮遊砂）移動の非平衡性が重要な役割を果たすことはすでに述べた。したがって、非平衡状態の浮遊砂濃度分布とその移流・拡散・沈降過程が再現できる水深変化予測モデルを用いれば良いことになる。榎木ら（1991）は Split-operator-approach を適用して移流拡散方程式を解き、航路を副断面化することによる埋没量減効果を検討している。

一方、港湾埋没も浮遊漂砂の非平衡性が重要な役割を果たすが、港口から港内への底質の持ち込みの過程では水粒子運動の水平軌道長の長い流体運動の存在が必要となる。松岡ら（1991）は小規模港湾内の周波数応答から、港内振動を引き起こす長周期波による浮遊漂砂の港内堆砂モデルを提案している。また、田村・灘岡（2001）は、防波堤先端で発生する水平大規模渦を計算し、それによる底質の巻き上げと港内への移流堆積を計算することにより、港湾埋没が生ずる可能性を指摘している。

このときの問題点は、以下のようなものがある。

・底質粒径が細かい場合の底質浮上・沈降限界、巻き上げ量

砂質の海底の場合については、移流拡散方程式の底部境界条件としての基準点濃度あるいは pick-up rate の表現が提案されている。あらかじめ、再現性の良い表現を決めておけば問題はない。しかし、内部粘性の影響が無視できないようなシルトあるいは粘性土の場合の巻き上げに対する限界せん断力、巻き上げ量は、

底質の種類、含水比に大きく依存する。さらに、フロック化のため、沈降速度が濃度の多価関数となり、より現象が複雑となる。なお、鶴谷ら（1990）は、沈降速度を濃度の一価関数で近似する式を提案している。

・フロキュレーション（凝集）効果の影響

河川流送土砂が塩水に接すると、凝集効果により沈降速度が増大し、淡水中の数倍から数十倍の量の底質が堆積することが知られている。河口港あるいは塩水が遡上する領域内にある河川港・航路では、これによる埋没が問題になるが、定量的に評価する方法は、まだ確立されていない。

（4）河口閉塞の予測手法と問題点

河口砂州変形の数値予測は、宇多（1982）によって改良された汀線変化予測モデルを用いて初めて行われた。この計算は、河道内にすでに存在するモデル化された砂州の変形に対して行われたものである。砂州の存在しない平行な河道が海岸に接続した初期地形からの砂州形成過程の計算も、いわゆる水深変化予測モデルで行われている（Chun 1998）。図-12にその結果の一例を示す。

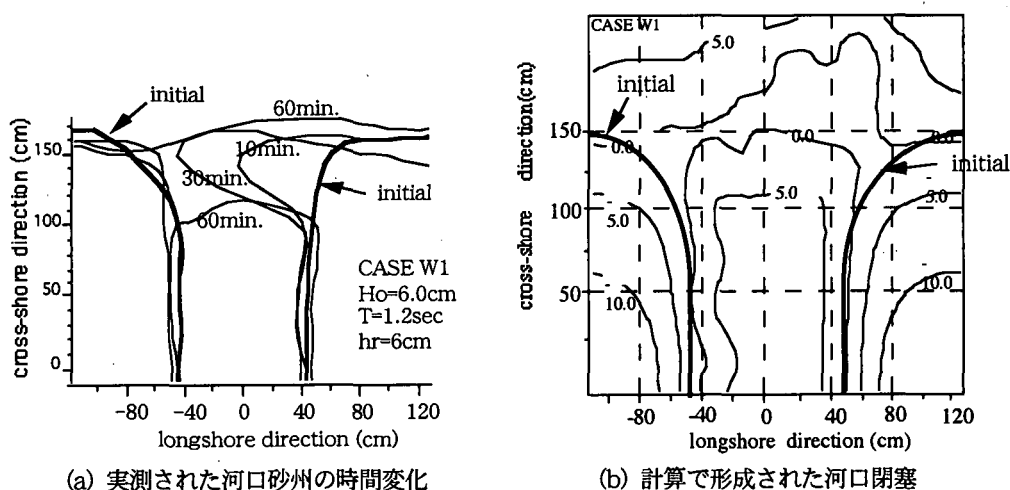


図-12 河口砂州形成過程の実験結果と計算結果の比較

図-12の(a)は実験結果で、(b)は初期地形上で波と流れ及び局所漂砂量の計算を行い、漂砂移動連続式により地形変化計算を5分間行い、変化した地形上で波・流れ・漂砂量の計算を行うという手順を繰り返し合計1時間の間に生じた河口砂州地形を計算したものである。ここでの問題点は、以下のものが上げられる。

・地形変化の初期値依存性に起因する誤差

砂州形成の計算は、すでに存在している汀線あるいは等深線位置の変化を計算するのではなく、新たに形成される砂州地形の時間発展を計算していくことになる。上述の方法で地形変化と流体運動場の計算を交互に行って計算される砂州地形は、実際の砂州形成過程と同じ過程をたどる必要がある。図-12(a)に示すような河口砂州の形成過程が既知である場合は、その過程を再現できる時間間隔で計算を行えば良かった。しかし、全く未知の海浜変形を予測する場合には、どの程度水深変化が進行した後に流体運動場を計算するかによって結果が異なる。この点が解決すべき大きな問題点として残されている。

7. あとがき

漂砂移動に伴って生ずると予想される侵食/堆積による災害の予測手法と予測する場合の問題点について考えてみた。海浜変形は、時々刻々変化する外力に対応して生ずる漂砂移動の積分値として生ずるもので、津波や高潮による災害のような災害を発生させる外力を特定してそれを設計条件とすることが困難であるこ

と、さらに海浜変形が災害を引き起こす方向に進んでも、やがては回復する可能性があることから、災害発生 の閾値を決めることが困難であること、という二つの特徴を持っていることを指摘した。この意味で降雨 によって発生する土砂災害と類似した性質を持つものと考えられる。降雨による土砂災害の場合は、瞬間テ クな雨量強度のみではなく、累積降雨量が問題となる。侵食災害も、瞬間最大値としての波浪特性のみでは なく、高波浪の持続時間、すなわち累積入射波浪エネルギーフラックスのようなものが重要な要素となるも のと考えられる。従って漂砂災害を予測する場合の外力も、高潮同様、モデル台風を仮想進路上で動かせる ことによって推算される高波浪の時系列全体を対象に検討する必要があるのかもしれない。

もう一つの大きな問題は、不規則波に対する海浜の応答をいかに正確に予測するかということであろう。 かなり昔から指摘されている問題点ではあるが、まだ満足のいく答えは得られていないように思う。そのほ か、幾つか問題点を指摘したが、まだまだ多くの仕事がかかされているようである。近い将来、海岸工学講 演会などで、納得のいく答えが開けるのを楽しみにしている。

最後に、貴重な波浪観測データを提供いただいた国土交通省・高知工事事務所関係各位に感謝の意を表し ます。

参考文献

- 入江 功、灘岡和夫、近藤隆道、寺崎賢次（1984）：重複波による防波堤前面での2次元的海底洗掘-底質 の移動機構に注目した研究、港湾技術研究所報告、第23巻、第1号、pp.3-52.
- 宇多高明（1982）：海浜流、漂砂及び海浜変形に関する研究、東京工業大学博士論文、144p.
- 宇多高明（1997）：日本の海岸侵食、山海堂、442p.
- 浦南 満（2000）：沿岸砂州の侵食制御機能と沖合養浜の可能性に関する研究、大阪大学修士論文、57p.
- 大塚行則・三村信男・渡辺晃（1984）：不規則波による二次元海浜変形と岸沖漂砂、第31回海岸工学講演 会論文集、pp.321-325.
- 加藤一正、柳嶋真一、村上裕幸、末次広兄（1987）：短期汀線変動のモデル化の試み、第34回海岸工学講演 会論文集、Vol.34、pp.297-301
- 河田恵昭（1988）：海岸侵食制御構造物論、海岸、No.28、pp.21-31
- 金 嘉也、岩見洋一、榎木亨、出口一郎（1989）：離岸堤の沿岸流及び沿岸漂砂制御機能に関する考察、海 岸工学論文集、Vol.36、pp.444-445
- 建設省河川局海岸課監修（1994）：海岸保全計画の手引き、（社）全国海岸協会、170p.
- 国土交通省高知工事事務所（2002）：高知海岸波浪データ（CD）
- 榎木亨、高畑市三（1971）：海岸堤防局部の局所洗掘について（その2）-特に法面上の戻り流れの特性に ついて、海岸工学講演会論文集、Vol.18、pp.371-376
- 榎木亨、出口一郎、小野正順、Bae, Ki-Seong（1991）：浮遊砂の非平衡性に着目した航路埋没の数値計算法、 海洋開発論文集、Vol.7、pp.295-300.
- 清水琢三・山田晶子・内山一郎・渡辺晃（1995）：汀線変化を考慮した3次元海浜変形予測モデルの現地適 用性、海岸工学論文集、第42巻、pp.606-610.
- 清水琢三（2000）：海浜地形変化の数値モデル、海岸施設設計便覧、土木学会、pp.145-155.
- 高木利光（2001）：長期的汀線変化予測と侵食対策、2001年度水工学に関する夏期研修会講義集、B-6.
- 田中茂信・小荒井 衛・深沢 満（1993）：地形図の比較による全国の海岸線変化、海岸工学論文集、Vol.40、 pp.416-420.
- 田村仁・灘岡和夫（2001）：準三次元非平行浮遊砂輸送モデルの開発に基づく港口部での底質浮遊と輸送に 関する解析、海岸工学論文集、第48巻、pp.526-530.

する解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.526-530.

鶴谷広一, 村上和男・入江 功(1990): 多層レベルモデルによる港湾埋没の数値計算モデルの開発-熊本港への適用例-港湾技術研究所報告, 第29巻, 第1号.

出口一郎(1984): 緩傾斜護岸工法, 砂浜決壊の防止工法とその適用性に関する研究, 研究代表者尾崎晃, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No.A-59-1, pp.56-74

西隆一郎・佐藤道郎・中村和夫・矢車美政・又野康治(1987): 規則波・群波・不規則波を用いた3次元海浜変形実験, 第34回海岸工学講演会論文集, Vol.34, pp. 第34回海岸工学講演会論文集, Vol.34, pp.302-306.

松岡道男, 木下勝尊, 山本正昭, 森口朗彦(1991): 長周期水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討, 海岸工学論文集, Vol.38, pp.416-420

Deguchi, I. and S. K. Chun (1997): Formation of river-mouth Bar by waves and wave-induced current, Proc. 7th Int'l. Offshore and Polar Engineering Conf., 877-884