

論文の内容の要旨

論文題目 河口部における波・流れ・土砂移動に関する研究
(Field Study on Waves, Currents and Sediment
Transport around River Mouth)

氏 名 佐々木 勇弥

流砂系の総合的な土砂管理において、河川と海岸が接続する河口部は、河川の下流端、海岸の土砂の流れの上流端に位置するため、重要な管理ポイントである。また、河口部の適切な管理は、荒天時の防災・舟運・河口環境等にとっても重要である。しかし、河口部は、波・流れ・潮汐等の外力、及び、地形変化が激しい上に複雑であり、そのプロセスは十分に解明されていない。現象の激しさ、複雑さから実験や数値解析によるアプローチにも限界があり、その総体を理解するためには、現地調査に基づく実証的な知見の蓄積が重要である。しかし、既往の現地研究は、現地調査の時間密度が低いこと、継続的でないこと、3次元的に地形を計測していないこと、そして、大規模外力時の浅海域・遡上域のプロセスの観測が非常に少ないこと等の問題がある。そこで、これらの点を克服することで、一年のサイクルにおける各時期の外力特性と地形変化の関係の全体像、先行する時期から受ける影響等の複合的な地形変動機構、複雑な地形を持つ河口各地点での断面地形変動特性、浅海域・遡上域の土砂移動に直接的な外力場と地形変化の対応を実証的に明らかにすることを目的として、本研究を行った。具体的には、一年以上に亘り、天竜川河口域において、0.5秒サンプリングピッチの河口沖の水位変動を含む外力データの分析、高頻度で継続的な河口各地点の断面地形測量を含む現地調査結果の分析、河口を俯瞰した定点観測カメラで1.2秒もしくは2分間隔で継続して撮影した画像の解析を行った。

本論文では、河口部の地形変化によって、①長周期波の発達、②有効砂州高（海側、河道

側)、③開口部周辺の岸向き土砂移動、④地形履歴の4つの事項が重要な物理・概念であることを以下のように実証的に明らかにした。

●長周期波の発達

我が国のように温帯の季節変化が顕著である地域の河口部では、季節ごとの外力特性に対応した地形変化が生じる。冬季を代表とする波浪の周期が短く、波向が季節風に一致して一様な時期は、砂州伸長、開口部を通じた河口内部への土砂移動が卓越し、新たな土砂の堆積は低標高部に限定される。春季の様に、波浪の周期が短く、小規模な出水が生じる時期は、砂州伸長、開口部周辺における砂州海側への堆積が卓越し、新たな土砂の堆積は低標高部に限定される。台風期のような周期の長い高波浪が来襲する時期は、砂州を越える土砂移動が広域で生じ、大きな標高変化を伴う砂州の断面変化が顕著であり、出水による土砂移動も大きいいため、河口地形が大きく変わる。

既往研究では、主として、沿岸漂砂と出水による土砂移動に着目されてきたが、これらの視点のみでは、上記のような各時期の外力特性と地形変化の関係等を部分的にしかな説明することができない。波浪を外力とする土砂移動機構の理解が不足しているからである。波浪を外力とする河口部の土砂移動機構を理解するに当たっては、波浪の砂州遡上時に、砂州越波が生じるか否かが重要な観点となる。それにより、水・土砂の動きが砂州海側に限定されたものとなるか、砂州河道側まで移動するかの違いが生じ、河口部の土砂移動・地形変化特性が大きく異なるからである。そして、ここで重要となるのが、長周期波が発達しているか否かである。浅海域での碎波を通じて、その波高をほとんど失ってしまう短周期波と異なり、長周期波は、浅海域でも波高を増大させながら、砂州を遡上する。そのため、長周期波が発達すると、波浪の砂州遡上高が大きくなり、その結果として、砂州標高の高い地点でも越波が生じ、広い範囲で砂州を越える土砂移動が生じる。

また、高波浪時来襲時の砂州河道側に目を向けると、河口開口部に隣接する砂州先端部では、開口部から回り込んだ短周期波が遡上する一方で、先端部から離れると砂州上には長周期波のみが遡上する。この長周期波は開口部から離れるに従って減衰する。そのため、砂州先端部以外の河道側では、土砂移動外力は越波のみであると考えられる。

水深 40m 地点に位置する竜洋波浪観測所における水位変動記録の解析結果に基づくと、長周期波の波高は有義波の波高と周期の積に線形で、周期の長い高波浪が来襲する台風期には、長周期波の波高が大きくなる。そのため、上記のような台風期とその他の時期の地形変動特性の違いが生じることが確認された。

●有効砂州高（海側、河道側）

波浪の砂州遡上高は、その時々潮位と、平常波浪の遡上高、高波浪時の **wave setup**、長周期波の遡上高など各種成分の寄与で構成される。これらの合計が砂州標高より大きい時、砂州越波が生じるわけであるが、海側有効砂州高は、各地点での砂州標高から平均水位

(=潮位+高波浪時の wave setup の寄与分) を差し引いた物理量であり、その大小は、砂州標高が短周期波を主体とする平常波浪の遡上高に収まるか否かを判定する指標である。

砂州先端部や局所的に標高の低い部分では、海側有効砂州高が小さく、短周期波の越波による砂州の河道内への押し込みが顕著となる。長周期波が発達した際は、長周期波が砂州を越流し、砂州標高を低下させ、砂州後退を生じさせる。一方で、海側有効砂州高が大きく、砂州標高が短周期波を主体とする平常波浪の遡上高に収まらない場合は、長周期波の寄与が砂州越波の発生に支配的な要因となる。また、波浪が砂州を遡上する際、遡上が進むにつれ、短周期波は急激に減衰するため、海側有効砂州高の大きい地点では、砂州上での主要な土砂移動外力は長周期波となる。長周期波が十分に発達せず、越波が生じない時は、暴風海浜の形成に伴う前浜侵食や沿岸漂砂による地形変化が生じる。長周期波が発達し、越波が生じる際は、砂州の標高が変化し、長周期波が特に大きな場合は、砂州上の土砂が河道へ輸送され、本格的な砂州後退が生じる。

また、海底勾配も砂州越波の発生に影響する。そのため、河口テラスの発達状況によって砂州海側各地点の海底勾配に差が生じるため、同じ有効砂州高であっても、越波状況が異なってくる。長期的には、上流から河口への土砂供給が不足し、河口テラスが縮小すると、海底勾配が急になることで、砂州越波の頻度が増加することも懸念される。

河川流を外力とした地形変化に関しては、一般的に認識されているように、出水時に砂州の側岸侵食が生じる。そして、河口水位が砂州標高程度にまで達すると、砂州の越流侵食が生じる。河道側有効砂州高は、砂州標高と河口水位の差で定義され、その大小は、河川流の砂州越流の有無の指標となる。また、出水により河口水位が高い状況で、越波による土砂輸送が生じた際は、越波が砂州上の標高の高い地点で減衰することで、土砂が標高の高い地点に堆積する。そのため、河道側有効砂州高は、越波時の砂州断面変動特性の指標でもある。河道側有効砂州高が小さい時、越波による土砂移動が生じると、水際線変化は小さいが、砂州上に土砂がストックされるため、水際線変化のみに着目しては、土砂移動機構を見誤る可能性があり、河口管理の際、注意を要する。

●開口部周辺の岸向き土砂移動

河口部は、通常の海岸と異なり、河川と連続する水域が存在する。その水域周辺、すなわち河口開口部では、河川流の作用が大きくなると同時に、波浪の作用も周辺海岸は元より、砂州部とも異なってくる。開口部周辺での波浪を外力とした地形変化としては、まず、一般的に認識されているような、沿岸漂砂による砂州伸長が挙げられる。これは、砂州部からの土砂供給によって生じる、波向が砂州の伸長方向に一致している時の現象であり、波向が縮小方向の際には、沿岸漂砂によって、開口部を通じた海側から河道内への土砂移動が生じる。また、開口部周辺では、出水時の砂州の侵食や上流からの土砂供給によって開口部海側に堆積した土砂が、平常波浪時に岸向きに輸送されることで、水際線付近での土砂堆積が生じる。そして、特に重要な開口部に特有な現象は、高波浪来襲時、周辺海岸では、沖向きの土砂移

動が卓越し暴風海浜を形成するのに対し、岸向き土砂移動が生じることである。そのため、開口部では、常時、波浪による土砂移動は岸向き漂砂が卓越し、浅瀬が形成される。そして、それが陸地化し、海側有効砂州高の小さな砂州部のように河道側へ押し込まれていく。その結果として、開口部の縮小、砂州伸長、場合によっては河口閉塞が生じる。高波浪時の土砂移動は急激であるため、沿岸漂砂による砂州伸長に伴う開口部縮小以上に、注意を要する現象である。

また、高波浪を伴う出水時には、出水のみに着目されがちであるが、高波浪の存在に伴うラディエーション応力を通じた流況場の変化に加え、波浪による岸向き土砂移動が混在し、出水前後の開口部周辺の地形変化に影響を及ぼすことも鑑みるべきことである。

●地形履歴

河口部では、地形履歴という概念が重要である。地形履歴が意味することは、「河口部においては、先行する地形変化が後続する地形変化に強く影響するため、各時期の地形変動機構を理解するためには、地形変化を時系列的に捉えておく必要がある」ということである。短期の現象としては、例えば、台風出水による地形変化が挙げられ、高波浪時の越波による砂州標高変化が数時間から数日後の出水による砂州崩壊過程に強く影響する。特に、大規模な越波と出水が短期間に作用する際には大規模な砂州崩壊が生じ得るため、河口地形を大きく変える可能性があり、注意を要する。また、越波による河道側への土砂堆積と出水による側岸侵食がバランスすることで、イベント前後の水際線変化が小さくなるため、水際線変化の管理のみでは、土砂移動機構を見誤る可能性がある。この点からも注意が必要である。

より長い時間スケールにおける地形履歴の影響も存在する。例えば、出水後の開口部周辺で形成された浅瀬が数か月をかけて、岸向き漂砂により水際線付近で堆積する際に、砂州幅の沿岸分布を生じさせ、これが越波時の砂州標高変化にも沿岸方向の違いを生み、その結果、局所的な砂州崩壊等を生じさせる。

以上のように本研究では、河口部の水理・土砂移動現象を理解するうえで、既往知見として知られている、沿岸漂砂による土砂移動、平常波浪による岸向き漂砂、出水に伴う砂州侵食に加え、上記4つの事項が重要であることを継続的な観測を通じて実証的に明らかにし、複雑で激しい河口部の波・流れ・土砂移動を体系化する枠組みを構築した。これらは、学術面において河口プロセスの理解を促進するとともに、実務面においても河口管理に有用な視点を提供するものである。