

	ほりえ たけひと		
氏 名	堀江 岳人		
授 与 学 位	博士 (工学)		
学位授与年月日	令和2年9月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻		
学 位 論 文 題 目	港内埋没の発生機構に関する研究		
指 導 教 員	東北大学教授 田中 仁		
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 田中 仁 東北大学教授 風間 聡 東北大学准教授 有働 恵子 東北大学准教授 梅田 信		

## 論 文 内 容 要 旨

国内の漁港は、その多くが時々刻々と変化する漂砂移動、すなわち地形変化の影響を受けやすい砕波帯内や河口港として河道内に位置している。そのため、航路・泊地の埋没が度々発生しており、施設の維持管理・利用面などの課題が生じている施設が少なくない。漁港を対象とした航路・泊地埋没対策ガイドライン（水産庁漁港漁場整備部，2014）によると、全国の2304漁港のうち、約30%の762漁港が航路や泊地の港内埋没問題を抱えており、このうち641漁港で維持浚渫を実施している状況にある。港内埋没が問題となっている漁港のうち、港口が狭い小規模漁港は、1回の時化で多量の土砂が港内に流入することにより港内埋没が発生する事例が多い。既往の研究による港内埋没の発生機構として、短周期波成分の海浜流による浮遊砂の輸送、潮汐流と港内副振動に伴う長周期の流速場が重なって発生する流れによる浮遊砂の輸送、水平大規模渦による浮遊砂輸送現象などが挙げられているが、港口が狭い小規模漁港の港内埋没の特徴は、これらの発生機構と異なる特徴を有している。

本研究は、既往の研究による港内埋没の発生機構で説明が困難である、港口が狭い小規模漁港の港内埋没の発生機構の解明を目的とした。港内埋没の発生機構の分析を実施するにあたり、港内埋没と関連する小規模漁港の港口埋没の発生機構を検討した。港口に堆積した土砂が港内へ輸送されている可能性があるため、港外から港口までの土砂輸送の過程を把握することは重要である。また、小規模漁港の港内埋没を検討するにあたり、外力条件として重要である長周期波成分のパワースペクトルを算定する1つの考え方（モデル）を提案した。

本論文は5章からなる。第1章の序論は、本研究の背景、港内埋没の発生機構に関する既往の研究と課題、本研究の目的、論文の構成を示した。

第2章は、沿岸域に位置する小規模漁港における港口埋没の発生機構の解明を目的として、北海道噴火湾内に位置する落部漁港を対象に、波浪、流況、砂面変動、底質調査などの現地調査および港口埋没シミュレーションを実施した結果を示した。現地調査による港口埋没の要因分析は、短周期波成分の来襲により発生する海浜流のEOF解析（経験的

直交関数解析) 結果, スペクトル解析結果および潮位変化に伴うシーلز数の変化と地形変動との関係などの解析結果を基に検討した. 港口埋没シミュレーションによる港口埋没の要因分析は, EOF 解析により得られた短周期波成分に伴う海浜流の卓越モード別に外力条件を設定し, 港口埋没の再現性を評価することで, 港口埋没の要因となっている外力特性(風波とうねり性波浪)を検討した.

第3章は, 小規模漁港のうち, 河道内に位置する河口港の港口埋没の発生機構の解明を目的として, 北海道浦士別川の漁港施設を対象に, 水位, 流況, ネットワークカメラ, 底質調査などの現地調査および遡上波シミュレーションを実施した. 現地調査による港口埋没の要因分析は, 港口部に堆積する土砂とその時の短周期波成分の波向の条件, 港口部に堆積した土砂の河道上流側への輸送量などを基に検討した. 遡上波シミュレーションによる港口埋没の要因分析は, 現地調査結果で分析できなかった港口部およびその周辺での海浜流の分布特性を示すことで, 港口部での土砂堆積の要因を検討した. また, 中長期の海象変動(短周期波成分のエネルギーと波向の変動)による港口埋没への影響を考察した.

第4章は, 港口埋没の発生機構を踏まえ, 小規模漁港における港内埋没の発生機構の解明を目的として, 北海道噴火湾内に位置する黒岩漁港を対象に波浪, 流況, 砂面変動, 底質調査などの現地調査および港内埋没シミュレーションを実施した. 現地調査による港内埋没の要因分析は, 海浜流および長周期流動などの流況特性, 外力および地形変化と浮遊砂濃度の関係, スペクトル解析の結果を基に検討した. 港内埋没シミュレーションによる港内埋没の要因分析は, 短周期波成分に加えて長周期波成分を外力条件として考慮した場合の港口埋没の再現性およびその埋没過程と物理特性を示すことで, 港内埋没の発生機構を解明した. また, 小規模漁港における港内埋没の発生機構で重要な長周期波成分のパワーおよび周期, 拘束長周期波と自由長周期波の特性を踏まえ, 港内埋没シミュレーションの外力条件の設定として汎用性の高い長周期波スペクトルのモデルを提案した.

第5章は, 結論と今後の展望である. 以下に, 各章の結果を要約する.

沿岸域に位置する港口埋没の発生機構の解明に向けて実施した落部漁港の現地調査結果および港口埋没シミュレーション結果より, 港口埋没は短周期波成分の海浜流が港口周辺で減衰し, 土砂の輸送能力が低下することで発生することを示した. 一方, 落部漁港の港口埋没発生の特徴の1つとして, 周期が長いうねり性波浪の卓越時における海浜流の第2モードは, 港口向きへの海浜流を弱める作用をしているため, 港口埋没を発生させにくいとの結果が得られた. また, 水深やスペクトル形状の変化による砂面上昇は, 海底面に作用する有義波動流速, すなわちシーلز数で説明することができたが, 海浜流の卓越モードとも関連づけることが可能であった. 落部漁港周辺の地形は, 動的平衡状態であること, 主防波堤による回折は入射波の波浪, 入射角度, 波の方向分散性, 水深の影響を受けるが, 落部漁港の波向きはほとんど一方であることから, 海浜流の卓越モードより, 港口埋没の発生する外力条件を特定できる可能性があることを示した. 最も港口埋没を引き起こしやすい海浜流の卓越モード, すなわち波浪エネルギーを抽出することにより, 効率的・効果的な埋没対策の検討が可能となる. また, 港内埋没の発生は, 港口に埋没した土砂, または港口向きへ輸

送中の土砂が、何らかの外力の作用によって（主に長周期波の港内進入に伴う港口周辺での流速の増加によって）港内へ進入すると考えられることから、港外における海浜流の卓越モードを把握し、港口向きへの土砂輸送を把握することは、港内の埋没量および港内埋没対策を実施する上で重要であることを示した。

河口港の港口埋没の発生機構の解明に向けて実施した浦土別川河口港の現地調査結果およびシミュレーション結果より、浦土別川港口部は風波などの短周期波成分、河道内を含むインレット全体は潮流の影響が支配的な外力であることを示した。港口部の堆積土砂は、高波浪発生時に発生するのではなく、汀線に対して右入射の短周期波成分の波浪が来襲した際、右岸側の導流堤前面に発生することを明らかにした。これは、右岸側の汀線からの沿岸漂砂が、河道内に流入するためである。また、導流堤の天端を超える大潮時に右入射の短周期波成分の波浪が来襲した場合は、導流堤を越えて土砂が進入し、港口埋没が発生することを明らかにした。浦土別川の上流 400m に位置する濤沸湖の湖内砂州の底質は、下流側の湖口で中砂と黒色のシルト成分の境界が明確に分離していたことから、湖内砂州を構成している土砂は海浜砂であることを明らかにした。河道内の流速と同位置の摩擦速度の関係は、順流と逆流で両者のモードが異なり、同じ摩擦速度の絶対値でも両者の流速（絶対値）が異なっていることを明らかにした。これらの関係より河道内の通過土砂量を算出し、港口部に堆積した土砂は潮流の作用によって上流側へ輸送されていることを示した。なお、この土砂移動は、現地調査によりカメラ観測で確認できた港口埋没の過程と同様であることを確認した。網走沖では、過去 20 年間のデータより約 10 年周期で波向および波浪エネルギーが変化していることを示した。浦土別川の港口埋没は、短周期波成分の波向きの変化で港口部での埋没量および港口埋没の発生の有無が決定することから、港口埋没対策は、中長期の気候変動による海象状況、特に短周期成分の特性および変動を踏まえた上で決定することが重要であることを提案した。

港内埋没の発生機構の解明に向けて実施した黒岩漁港の現地調査結果より、風波成分の大きさが港外における浮遊砂の巻き上げ量、地形変化量と関連していることを示した。また、長周期波流動は、長周期波成分のパワーが大きいほど振幅も大きいことを示した。一方、EOF 解析による流況の卓越モードおよび平均流速の統計結果より、港外の土砂が輸送され港口埋没へ寄与していることは想定できるが港内まで土砂が輸送されるか否かの判断までは困難であった。そこで、港内埋没シミュレーション結果を基に、黒岩漁港における港内埋没の発生機構を検証した。その結果、港内埋没の発生は、沖側で発生した長周期波成分が港内へ進入することにより港内外で水位差が生じ、その水位差によって底面流速および砂のシールズが卓越して港口部における浮遊砂の巻き上げ量（pick-up rate）が多くなり、巻き上げられた浮遊砂が港内へ輸送された結果、港内埋没が発生する機構を明らかにした。短周期波成分のみを考慮した港内埋没シミュレーション結果は、港内埋没の発生が見られず、港口埋没が発生していた。この要因は、短周期波成分のパワー、すなわち海浜流が港口部で遅くなり、港内まで到達していないためである。なお、港外側および北防波堤前面における浮遊物の巻き上げや地形変化は、主に短周期成分が寄与しており、この要因は、港外における長周期波成分による流れおよび水位変動が、風波成分と比較して小さいためである。港外で巻き上げられた浮遊砂は、流況の卓越モードにもよる

が、短周期成分による海浜流に伴って、港口向きへ輸送されることを示した。長周期波を考慮した場合、港口周辺では港内へ向かう流速が速くなるため、港外で巻き上げられた浮遊砂の一部は、港口で巻き上げられた浮遊砂と合わせて港内へ輸送され、港内に堆積する可能性が高いことを示した。

黒岩漁港を対象として実施した港内埋没シミュレーションなどの結果を基に、港口が狭い小規模漁港の港内埋没土砂量は、長周期波成分のパワーによる港内外の水位差に伴って発生する港口部での流速の大きさと、その水位差が発生する長周期の周期性、すなわち繰り返し回数で決定することを示した。そのため、港内埋没シミュレーションを用いて港内埋没量を算出する際には、外力条件として長周期波成分のパワーとその卓越周期の設定が極めて重要である。一方、現地調査で観測した長周期波成分はピーク周波数が存在しておりこの要因は長周期波成分の一部に短周期波成分の波群構造に伴って発生する拘束長周期波のみならず自由長周期波が存在していることを示した。

港内埋没の発生機構で重要な長周期波成分のパワーおよび長周期波の周期、長周期波が持つ物理的特性すなわち拘束長周期波と自由長周期波の特性を踏まえ、港内埋没シミュレーションの外力条件として設定が可能な長周期波スペクトルを算出するためのモデルを提案した。本モデルを適用して算定した長周期波スペクトルは、観測結果の長周期波スペクトルの形状すなわち長周期波成分のパワーと周期特性の傾向を良く示した。本モデルは、対象とする場での代表的な風波スペクトルが与えられれば算定が可能であるため、港内埋没シミュレーションの外力条件の設定方法として、汎用性が高い。しかしながら、長周期波スペクトルの観測値より、モデルのピーク周波数や長周期波成分のパワーがやや大きめに出ること、低周波側での立ち上がりの差異は、本算定モデルの単純さに加えて、伝搬距離、水深の選定方法に課題がある。また、モデルの適用範囲として、多方向性が強い時には方向スペクトルの考え方を取り入れる必要がある。なお、拘束長周期波の波形は、多方向不規則波の場合は、成分波間の干渉が方向分散によって弱くなるため、拘束長周期波の振幅は単一方向波に比べて小さくなることに留意する必要がある。本研究で実施した港内埋没シミュレーションは、砕波に伴う浮遊砂の巻き上げおよび遡上域から発生する浮遊砂が考慮されていないため、短周期波成分により発生する浮遊砂量がやや過少評価となっている可能性がある。また、本研究で実施した波浪流況シミュレーションは、成分波の重ね合わせによる沖側の造波条件を適用しているため、沖で観測された拘束長周期波の wave-set down と自由長周期波の wave-set up の水位変動を無視していること、砕波はエネルギー逸散効果としてモデル化をしているため、砕波による拘束長周期波から自由長周期波の変換が考慮されていないため、長周期波成分の平均水位がシールス数の算出、すなわち浮遊砂の巻き上げ量に考慮されていない。以上の結果より、砕波や遡上域における浮遊砂の巻き上げ、自由長周期波および拘束長周期波の平均水位は、本研究で示した小規模漁港の港内埋没の発生機構の内、浮遊砂の発生量および港内埋没量の精度に関連する事項であるため、これらのモデルへの取り込みが必要など、まだ多くの課題と改善の余地を残している。

# 論文審査結果の要旨

国内の漁港においては航路・泊地の埋没が度々発生しており、施設の維持管理・利用面などの課題が生じている施設が少なくない。港内埋没が問題となっている漁港のうち、港口が狭い小規模漁港は1回の時化で多量の土砂が港内に流入することにより港内埋没が発生しており、これは既往の研究による港内埋没の発生機構と異なる特徴を有している。そこで、本研究は、既往の研究による港内埋没の発生機構では説明が困難である、港口が狭い小規模漁港の港内埋没の発生機構の解明を目的とした。港内埋没の発生機構の分析を実施するにあたり、港内埋没と関連する小規模漁港の港口埋没の発生機構を検討した。また、小規模漁港の港内埋没を検討するにあたり、外力条件として重要である長周期波成分のパワースペクトルを算定する1つの考え方（モデル）を提案した。

第1章は、本研究の背景、港内埋没の発生機構に関する既往の研究と課題、目的、論文の構成を述べている。

第2章は、沿岸域に位置する小規模漁港における港口埋没の発生機構の解明を目的として、北海道落部漁港を対象に現地調査および港口埋没シミュレーションを実施し、港口埋没の主要な外力は短周期波成分海浜流であること、港口埋没の発生指標の1つとして海浜流の卓越モードの重要性を明らかにした。本成果は、効率的・効果的な港口埋没対策および港内埋没量を検討する上で重要な成果である。

第3章は、河口港の港口埋没の発生機構の解明を目的として、北海道浦士別川の漁港施設を対象に現地調査および港口埋没シミュレーションを実施し、港口部の堆積土砂は主に短周期波成分の波浪により発生すること、港口部に堆積した土砂は潮流の作用によって上流側へ輸送されていることを明らかにした上で、港口埋没対策は中長期の気候変動による短周期波成分の変動、特に波向およびエネルギーの変動を踏まえて決定することが重要であること示した重要な成果である。

第4章は、港口が狭い小規模漁港の港内埋没の発生機構の解明を目的として、北海道黒岩漁港を対象に現地調査および港口埋没シミュレーションを実施し、長周期波成分による港内埋没の発生機構を明らかにした上で、港内埋没の発生で重要な長周期波成分のパワーおよび長周期波の周期、長周期波が持つ物理的特性すなわち拘束長周期波と自由長周期波の特性を踏まえ、長周期波スペクトルを算出するためモデルを提案した。本成果は、今後の港内埋没対策を実施する上で、非常に重要な成果である。

第5章では、本研究で得られた知見及び港内埋没量の把握に向けた今後の課題を述べている。

以上要するに、港口埋没の発生機構および港内埋没の発生機構について、その要因となる外力特性として港口埋没は海浜流の卓越モード、港内埋没は長周期波であることを明らかにし、特に後者についてはそのモデル化の提案を行っている。これらの成果は、今後の港内埋没対策に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。