

論文の内容の要旨

論文題目 沿岸長周期波の生成・伝播過程に関する研究

A Study on Nearshore Generation and Propagation of Infragravity Waves

氏名 松葉 義直

沿岸域の持続可能な発展には、高波浪の水理特性の正確な理解に基づく防災・海岸保全計画が肝心である。高波は台風等の気象擾乱に伴い高頻度に発生し、沿岸部の人々の日々の生活を脅かす。我が国では既往最大クラスの強大な台風が近年立て続けに来襲し、人口集中地域に大きな高波被害をもたらしている。将来的にはさらなる気象災害の激甚化が予測されるなかで、我が国のみならず世界的にも高波は防災計画に欠かせない検討事項であり、沿岸での高波浪特性の正確な理解は喫緊の課題である。

海域では様々な周期を持つ波が重合している。沖合では周期 10 秒前後の波が卓越しており、それら短周期波は重合することで波群を構成する。やがて水深の小さい沿岸部に伝播するこの波群は、地形の影響を受け砕波して減衰する一方、長周期の波を発達させる。この長周期波は特に高波浪時に発達し、沿岸域では砕波減衰する短周期波に対し卓越的になり、高波による浸水被害や沿岸地形変化の主要因となりうる。そのため、この長周期波の水理特性の理解が防災計画策定の上で肝要である。しかし、水槽実験では設備上の制約を受けるため、複雑な海岸地形や多様な沖波条件下での長周期波の生成・伝播過程の分析は難しく、現地での観測とそれらの数値モデルによる再現が重要となる。しかしながら、広範な領域を対象とした地形・沖波・沿岸波浪の詳細な観測は困難で例が少なく、実海岸での長周期波の生成・減衰過程や、沿岸波浪場への影響について未だに理解が十分に及んでいない。

本研究では、複数の砂浜海岸での現地観測データと数値再現をもとに、長周期波の生成・減衰過程と、長周期波が沿岸波浪場にもたらす影響の二つを議論した。前者については、沖波特性・潮位・地形といった要素が長周期波の生成・減衰にもたらす影響の分析を行い、その物理プロセスを明らかにした。また後者については、長周期波の発達がどのように沿岸高波浪や遡上に影響しているのかについて、台風来襲時の波浪観測データと遡上痕跡高観測データをもとに議論を行った。本研究を通じ、より正確な高波災害予測手法の確立に必要な数々の知見を得ている。

各章の要旨を以下にまとめる。

第 2 章ではこれまでの長周期波に関する知見を取りまとめた。特に長周期波の生成・減衰メカニズムに関する知見を網羅的に議論し、より多様かつ複雑な地形・沖波条件での長周期波の生成・減衰プロセスが重要な検討課題であることを明確にした。また、高波遡上の推定手法に関するこれまでの知見もとりまとめたうえで、長周期波の発達との関係について示し、長周期波の生成・減衰に関わる物理プロセスの考慮が、遡上高の正確な推定に重要な要素となっていることを明確にした。加えて、沿岸波浪再現のための数値モデルの現状についても簡潔に取りまとめている。

第 3 章において本研究で用いた数値再現手法およびデータ解析手法を取りまとめたうえで、第 4 章に本研究で分析対象とした現地観測データ、および該当期間の海象条件をまとめている。多様な沖波条件での長周期波の生成・減衰を分析対象とした波崎海岸での観測では、独自に構築した遡上観測システムを用い、沖波・沿岸波浪・地形・遡上の約 9 か月に及ぶ長期観測を実現した。平塚海岸においては、これまで観測例の少ない沿岸砂州を擁する急勾配海浜における波浪・遡上の観測を行った。また、西湘海岸においては既往最大クラスの 2017 年台風 21 号および 2019 年台風 15 号・19 号来襲時の観測データを分析対象とした。観測が難しい極浅海域については、監視カメラによる撮影動画をもとに水位変動の観測を実現した。台風ピーク時には最大で波高 2 m を越える長周期波が発達していた。特に極浅海域では長周期波が短周期波と同程度の大きさとなり、被災に大きく影響していたことが示唆された。

第 5 章では、観測データと数値再現結果に対する分析をもとに、長周期波の生成・減衰についての議論を進めている。波崎海岸における長期観測結果からは、その豊富なデータを活かし、多様な沖波特性による長周期波発達への影響を議論した。その中では、入射波高の増大だけでなく、入射波周期の増加が拘束波としての長周期波の増大を招くことを確認した。長周期波波高および周期は沖波スペクトルの広がりにも大きく影響され、より広いスペクトル幅をもつ条件では、浅水変形を通じて増幅しやすい比較的周期の短い長周期波成分が生成され、沿岸部でより大きな長周期波波高をもたらすことが明らかになった。一方で長周期波の減衰率にも長周期波周期は影響し、周期の短い長周期波は、砕波帯内で短周期波にそのエネルギーを遷移させることで大きく減衰していた。こうしたプロセスは長周期波遡上にも影響しており、入射波高が小さい条件下ではスペクトル幅の広がりに応じ長周期波遡上が増大するが、入射波高が大きくなると長周期波の減衰が進むため、スペクトル幅の遡上への影響は限定的になることが分かった。急峻な前浜勾配と沿岸砂州を擁する平塚海岸においては、緩勾配海浜における過去の観測例とは逆の傾向となる、低潮位時の長周期波増大が観測されており、その潮位変動と沿岸砂州上での砕波の有無との関連について議論した。低潮位時には沿岸砂州沖側での長周期波へのエネルギー遷移が増加し、砂州上での砕波を経て自由波となった長周期波は、急峻な海浜においてほぼ全反射し重複波を形成していたことが数値再現から明らかになった。一方で高潮位時には沿岸砂

州上での砕波が生じず、長周期波へのエネルギー遷移の大部分は沿岸砂州岸側の限られた範囲で起きていた。さらに、急峻な海浜部での短周期波の砕波が、入射した拘束波とは逆位相の動的なセットアップを発達させ、結果として反射波を低減させていたことが分かった。西湘海岸における高波浪時の観測からは、大磯港西側の観測地点では入射長周期波が反射波成分を上回った一方、東側の観測地点では反射波成分が卓越的であり、沿岸方向に異なる特徴が確認できた。大磯港西側の観測地点では、屈折の影響で入射波高が小さく、かつ急勾配の海底面であった一方、東側の観測点では入射波高が大きく、かつ緩勾配の海底面で、前者でより長周期波が増幅されたことが示唆された。また一方で砕波帯内では長周期波は短周期波にエネルギーを流出し、顕著な減衰に転じていることが分かった。以上の複数の砂浜海岸での観測においては、長周期波は拘束波としての生成が顕著であり、それら長周期波の生成・減衰プロセスは沖波特性や海岸地形によって大きく変化することが分かった。さらに、これまで個別のプロセスとして議論されてきた長周期波の生成・減衰メカニズムは、相互に関連しうるものであることが示唆された。

第 6 章では長周期波が沿岸波浪場に与える影響について分析している。2017 年台風 21 号の観測データからは、波別解析をもとに砕波帯外・内それぞれでの個別波の波高と長周期波の位相関係を分析した。砕波帯外では、拘束波として発達した長周期波の谷の上を高波浪が伝播していることが確認された。一方砕波帯内では、長周期波の谷の上の短周期波は長周期波による局所的な水深の低下と波高の大きさ故に砕波が早まる一方、峰の上を伝播する短周期波は局所的な水深の増加により砕波減衰が遅れるため、砕波帯内では高波浪となっていた。この長周期波による砕波の変調は浅海部での波高の確率分布に影響し、長周期波の存在が高波浪の発生頻度を引き上げていることが観測から明らかになった。長周期波による沿岸高波浪への影響については、2019 年台風 15 号・19 号来襲後の西湘海岸における遡上痕跡高調査の結果と、数値モデルによる沿岸波浪の再現からさらなる分析を行った。台風来襲後の痕跡高の分布は、波浪推算結果と前浜勾配から既往の経験式を用いて大部分は良好に説明されたが、15 号・19 号来襲後のそれぞれの最大痕跡高を記録した地点では過小評価となった。沖波波高が 5 m 程度と比較的小さく、方向集中度の高い台風 15 号のケースでは、浅海部での屈折による入射波の集中がより大きな遡上を招いたことが数値再現から示唆された。一方、沖波波高が 8 m を越えた台風 19 号来襲後に最大痕跡高の観測された大磯港西側では、大磯海脚で捕捉された長周期波が、沿岸方向重複波を形成することで長周期波の局所的な増幅を招いていたことが分かった。この局所的な長周期波の増幅は短周期汀線変動の極値分布と相関しており、長周期波はそれ自身の水位変動だけではなく短周期波の遡上をも増大させることで、全体としての遡上高の増大を招いていたことが示唆された。以上複数の台風来襲時の分析を通じ、沿岸高波浪および遡上は単純な短周期と長周期波の線形和で説明されるものではなく、砕波プロセスを通じ非線形に増大するものであることが明らかになった。

第 7 章に本研究の結論と今後の課題を示した。本研究は、多様な条件での波浪観

測と数値再現を通じ、沿岸での長周期波水理特性は多様な沖波特性と沿岸地形の影響を受け大きく変容することを示し、かつ高波浪時に沿岸で発達する長周期波が高波被害を増大させるメカニズムを明らかにしたものである。本研究で得られた成果は、海洋波の物理という基礎研究を発展させるだけでなく、工学的にも高波防災や海岸保全の実効性の向上に対し多大な貢献が期待されるものである。