

うねり性波浪の来襲時間と土砂移動の関係*

東北大学大学院工学研究科、(株) アルファ水工コンサルタンツ 堀江 岳人
北海道水産林務部水産局漁港漁村課 野阪 弥寿二
東北大学大学院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

既往の知見より、うねり性波浪の発生に伴う長周期波は、漁港及び港湾における湾内副振動、砂浜侵食、防波堤等の災害等に影響を及ぼすことが知られている。うねり性波浪は、波形勾配 (=波高/波長) が小さく空間的スケールが大きいこと、エネルギーも小さいことから、実験的スケールでの検討は難しい。そのため、うねり性波浪や長周期波による海岸災害の要因を検討するにあたっては、現地観測もしくは数値計算等によるデータ分析と実際の海岸災害の発生状況を付け合わせた検討が重要であると考える。うねり性波浪の検討事例として、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の改訂版が平成 30 年度からの施行を目指して改定案が検討されており、その中で防波堤等の耐波設計として従来の設計波に追加的にうねり性波浪の導入が検討されているところである。本解説書では、うねり性波浪を有義波周期 8 秒以上で、かつ波形勾配が概ね 0.025 未満として定義している。

本論で検討対象とした漁港は、その多くが碎波帯付近に位置しており、それらの機能維持にあたっては港内侵入波の低減すなわち港内静穏度の向上や、出入港時における航路の維持すなわち航行する船舶の喫水の確保が極めて重要である。例として、北海道南西部に位置する内浦湾（噴火湾）では、ホタテの養殖など多くの漁港施設が存在しているが、内浦湾では砂浜海岸のため、従来から海岸侵食や沿岸構造物周辺の埋没が問題となっている。過去の検討により、内浦湾では夏季は波浪の発達が小さく侵食の影響が小さいが冬季になると強い季節風や低気圧の通過に伴い高波浪が発生し、湾内的一部が侵食され沿岸漂砂となり、海岸構造物周辺に堆積することが示されている。しかし、外力である波浪・流況状況と海底地形の変化を同時に観測した事例は無く、港口埋没の要因が未解決となっていた。そこで本論では、港口で発生する土砂移動について風波の来襲時間とうねり性波浪の来襲時間に着目し、一考察を行った。

2. 風波及びうねり性波浪と長周期波の関係

風波は不規則性で波形勾配が大きい発達過程の波であり、ここでは風波の限界周波数と風波成分の裾の位置を考慮し $f \geq 1/25\text{Hz}$ (周期にして 25s) の成分を風波成分、残りの成分 $1/1800\text{Hz} \leq f \leq 1/25\text{Hz}$ を長周期波成分として定義した。うねり性波浪も $f \geq 1/25\text{Hz}$ の範囲内に位置するが、基本的には波高と周期の時系列変化および波形勾配を基に決定した。うねり性波浪の本来の意味は波の連なりの度合いを意味するが、最大波高に準ずる大きな波高を持つ波の出現頻度が高い場合にも、うねり性波浪が発達した状態として広義に捉えられている。

(1) うねり性波浪の指標

* The relationships between harbor channel sedimentation and long period waves by Takehito Horie, et.al.

これまでスペクトル幅パラメータ ν , J1,J2, Groupness Factor (GF) 等のうねり性波浪の指標が提案されているところである。GFは物理的イメージが描きにくく、かつ成分波の位相関係に強く支配されるために扱いにくい量となっている。本検討で用いたスペクトル幅パラメータ ν については後述する。

(2) 長周期波の発達・減衰とうねり性波浪の関係

これまで得られている知見を基に、風波及びうねり性波浪の発達・減衰と長周期波（ここでは、拘束長周期波）との関係を示す。風波もしくはうねり性波浪のスペクトルから包絡波2乗スペクトルを算出すると以下となる（Tayfun,1989）。

$$S_{A^2-T}(f) = \frac{8}{2\pi} \int_0^\infty S_w(f)S_w(f+\tau)d\tau \quad : \text{式 (1)}$$

(S_{A^2-T} : 包絡波2乗スペクトル, S_w : 風波 or うねり性波浪のスペクトル, f : 周波数)

包絡波2乗スペクトルを基に各時間帯の風波もしくはうねり性のピーク周波数と潮汐変動を考慮した水深より Longuet-Higgins & Stewart(1962)の拘束長周期波解を用いた場合、長周期波スペクトルは以下となる（Horie, 2003）。本結果より、長周期波の諸特性は $f \geq 1/25Hz$ のスペクトル形状すなわち風波及びうねり性波浪の特性により決まることがわかる。

$$S_l(f) = T_f(f) \cdot S_{lb}(f) \quad : \text{式 (2)} \quad T_f = 1 + n^2 - 2n(\cos(n-1)kx) \quad : \text{式 (3)}$$

($S_l(f)$: 長周期波スペクトル $S_{lb}(f)$: 拘束波スペクトル、 $n : C_g/C_\infty$ 、 $C(\sqrt{gh})$)

風波もしくはうねり性波浪の有義波高を用いて、長周期波の有義波高を出来るだけ理論的に推定すると、Longuet-Higgins & Stewart(1962)の拘束長周期波解より、

$$(H_{lb(1/3)}) = \beta B \left(\frac{1}{2} H_{w(1/3)} \right)^2 / h \quad : \text{式 (4)}, \quad H_{l(1/3)} = \sqrt{\alpha} \beta B H_{lb(1/3)} \quad : \text{式 (5)}, \quad B = \frac{n'-1/4}{1-C_g^2/gh} \quad : \text{式 (6)}$$

と表せる（Horie, 2003）。ここで、 β : 定数 C_g : 基本波の群速度 C_p : ピーク周波数での波速, $n' : C_p$ と C_g の比, h : 水深である。なお、観測事例より、拘束長周期波の波高と風波もしくはうねり性波浪の波高比は、 ν の変化に関わらずほぼ一定で約 0.5 である。一方、拘束長周期波の周期と風波もしくはうねり性波浪の周期比は、スペクトル幅パラメータ ν と比例の関係にある。以上の結果より、長周期波は暫定的に風波より周期の長いうねり性の方が発達しやすいと仮定できる。

3. 漁港周辺での土砂移動と外力の関係

本章では、北海道に位置する 3 渔港（落部漁港・黒岩漁港・薰別漁港）で実施された土砂動態と外力、特にうねり性波浪との関係に関する検討結果を示す。

(1) 落部漁港

落部漁港は、内浦湾南西部の比較的湾口近くに位置している（図-1）。毎年航路埋没が発生しその度に維持浚渫が行われ、その浚渫量は年によって異なるが約 1,360~9,010 m³ である。本観測調査において、11/26~12/2 の時化で砂面が大きく変動していた（図-2）。特に、11/27, 11/29

及び12/1に砂面が変動しており、現地にて観測した有義波高および周期と砂面変動を比較すると、有義波高が0.8mを超えた際に砂面の急激な上昇が確認された（図-2）。取得した水位変動データに対してスペクトル解析を実施した（図-3）。更に得られた結果を用いて ν を算出した（図-4）。ここで、 m_0 、 m_1 、 m_2 はそれぞれスペクトルのn次モーメントである。

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} \right]^{1/2} : \text{式 (7)}$$

砂面の上昇時に、砂面変化が顕著な時刻において相対的に ν が低い傾向にあった（図-4）。参考として、11/29の有義波高および周期を用いて修正ブレッドシュナイダー・光易型スペクトル（修正BMS）より算出したパワースペクトルも図-3に示す。砂面変動時のパワースペクトルは、修正BMSより算出したパワースペクトルよりピーク周波数付近のパワーが尖っている形状であることから、風波と比較してうねり性が高いと考えられる。以上の結果より、本漁港ではうねり性波浪の卓越時に、砂面上昇が発生しやすい地形特性を有している可能性が考えられる。



図-1 落部漁港の調査地点

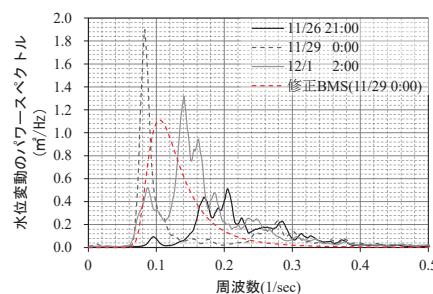


図-3 砂面変動時のパワースペクトル

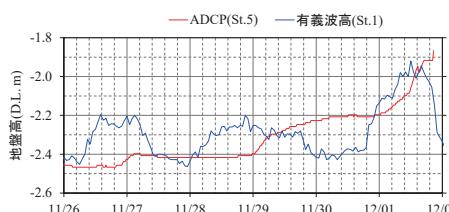


図-2 有義波高（左）および有義波周期（右）と砂面高の経時変化

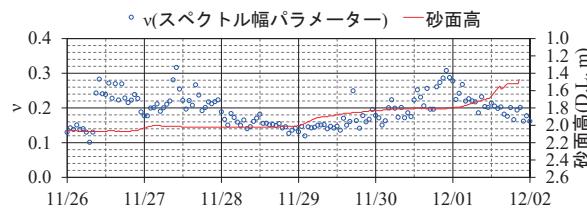


図-4 スペクトル幅パラメータ ν と砂面高の経時変化

(2) 黒岩漁港での事例

黒岩漁港は、北海道南部の内浦湾の奥部に位置する突堤式の漁港であり、毎年 $400\text{m}^3/\text{年} \sim 3000\text{m}^3/\text{年}$ 程度の維持浚渫が継続的に行われている。本漁港では、沖側の St.1 (水深約 11m), 岸側の St.2 および St.3 で波高計付電磁流速計 (St.1: WAVE HUNTER08, St.2: WAVE HUNTER04, St.3: WAVE HUNTER99) を設置し連続観測を実施した (図-5)。また、港口前面の St.4 で、超音波式砂面計 (ワークホース ADCP) を用いた砂面変動の連続観測を実施した。港口前面 St.4 の地形変化及び St.3 の流速に着目すると、風波卓越時に St.3 から港口方向への流向 S, SSE 及び SE が卓越しているため、St.3 周辺の土砂は港口方向へ輸送されたと考える。また、St.4 でも流向 S, SSE 及び SE が卓越していることから、St.4 周辺の土砂は港内へ輸送されていると考える。一方、堆積傾向が継続して見られた波群性波浪とそれに伴う長周期波の卓越時では、St.3 及び St.4 における流速が遅いため、港内への土砂輸送量は少ないと考える (図-7)。超音波式砂面計から出力される反射強度が浮遊土砂濃度と相関が高いことを前提条件とし、反射強度と砂面変動の関係について分析した (図-8)。期間 A では $H_{W1/3}$ の上昇に伴い反射強度も増加し、 $H_{W1/3}$ のピーク時すなわち最も侵食が進んでいる 10/1 の 3 時頃に反射強度の値もピークとなった。また、堆積が続く 10/3 の 12 時位までの間に反射強度は徐々に低下した。期間 B でも同様な結果であった。期間 A のうねり性波浪来襲時すなわち長周期波の発達・減衰後に採取したため、漁港周辺で主である中砂の割合が少なかった可能性が高い (図-6)。

以上の結果より、うねり性波浪の卓越に伴い長周期波も卓越し、その期間において濁水中の浮遊砂が沈降しているため、堆積が顕著であると考えられる。

(3) 薫別漁港での事例

薰別漁港は、北海道標津郡標津町字薰別に位置する第 1 種漁港である。本漁港では航路埋没が発生しており、毎年 $1,000 \sim 6,000\text{m}^3$ 程度 の浚渫が継続的に行われている。また、堆砂箇所が港口のみならず港内にまで至っていることが確認されている。波浪観測及び流況観測は水圧式波高計 (WAVE HUNTER08)，砂面観測はワークホース ADCP を使用して実施した。7/27 の 12 時頃より砂面高が低下し始め、7/28・6 時頃に最も低くなっていた。その後、徐々に砂面高が上昇し始め、7/29 頃には元の高さまで戻っていた。このような砂面高変動と同調して有義波波高も変動しており、砂面高が低下し始めた 7/29 の 12 時頃に有義波高が高くなり始め、最も砂面高が低下した 7/28・9 時頃にピークとなった (波高 : 1.25m)。期間中の有義波周期は 5 秒以下と短いが、風波のピーク後においても周期が上昇しており、また有義波周期及び有義波波高が小さくなるまで砂面高の上昇は続いている。以上の結果よりうねり性波浪の来襲期間における緩やかな堆積現象は、静穏化と共に濁水中の浮遊砂等が沈降してのものと考えられる。波高が低くても周期が長い状態が続くことで、砂面高が低下するケースも確認された。これはうねり性の波浪の持つ高エネルギーが作用しての現象と見られる。更に、循環流により、港口へ向かう流れが発生している場合はうねり性の波浪により侵食された砂が港口付近へ輸送され堆積する可能性が考えられる。

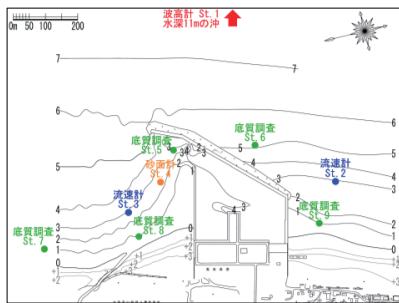


図-5 各観測地点

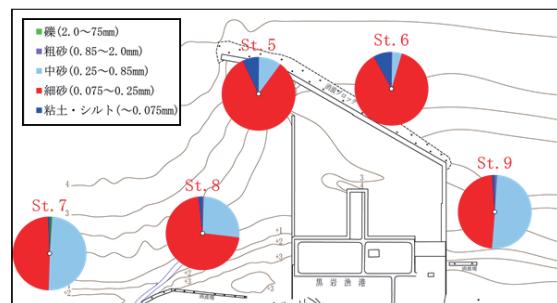


図-6 粒径調査結果

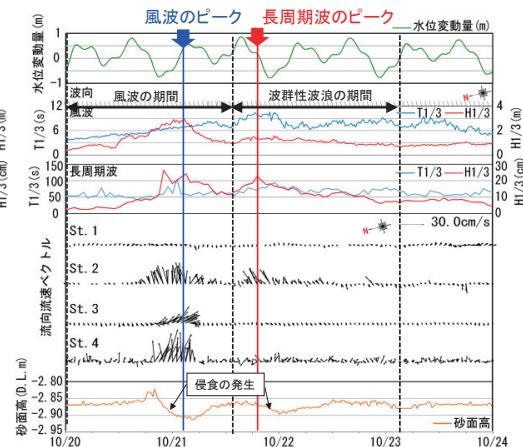
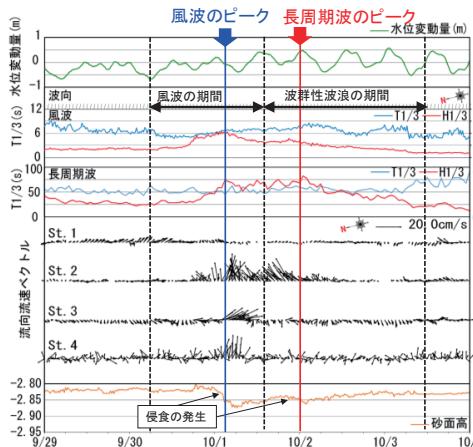


図-7 各連続観測の時間変化

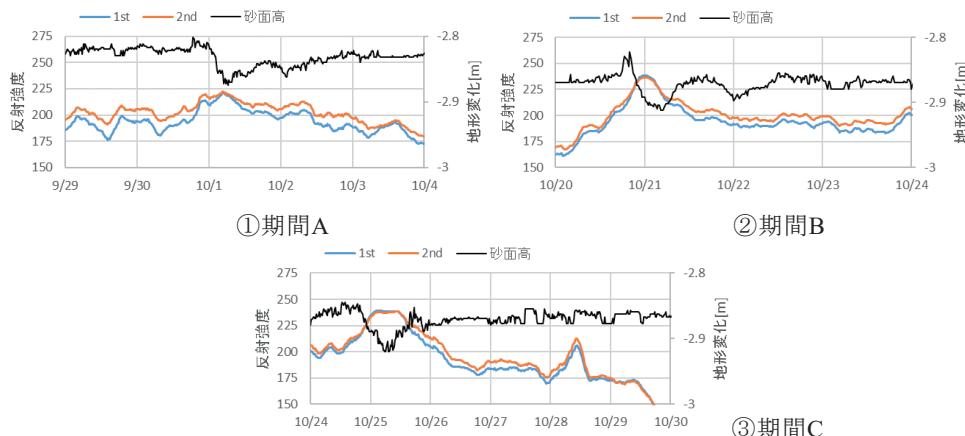


図-8 ADCPでの反射強度と地形変化（1stはADCP先端より0.92m, 2ndは1.12mの観測層）

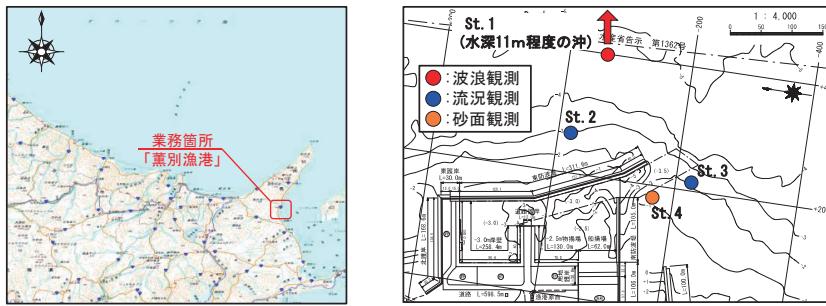


図-9 各調査地点（薰別漁港）

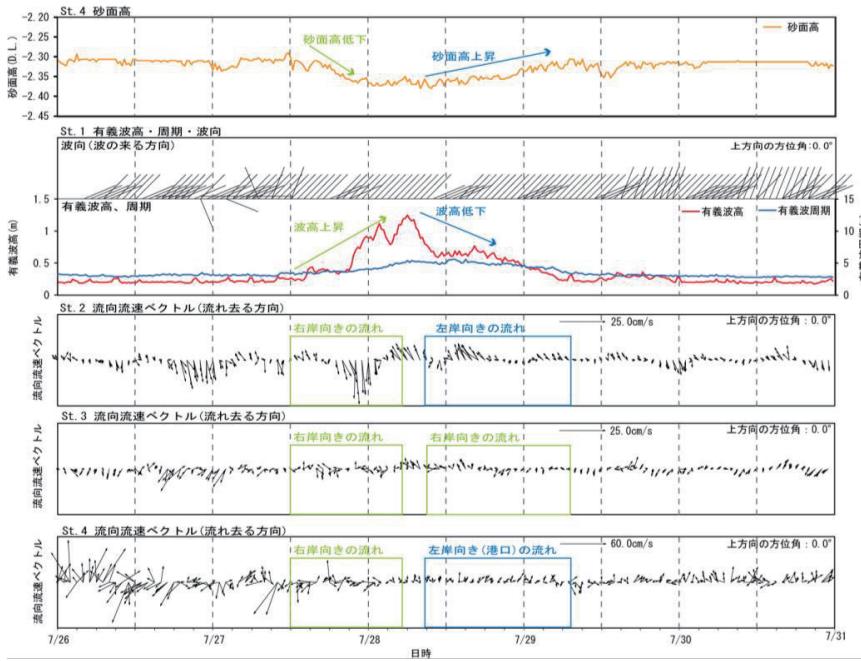


図-10 砂面高、波浪、流況の経時変化（7月 26～30 日）

4. 終わりに

具体的な土砂動態量などの定量的評価までは至っていないが、うねり性波浪は風波と比べて波高すなわちエネルギーは小さいが、うねり性波浪の来襲に伴う長周期波の卓越時において、土砂の堆積もしくは侵食が継続的に発生すると考えられる。なお、その土砂動態は、各漁港の地形の安定性等に寄るものと考えられる。

<参考文献>

Longuet-Higgins, M.S. and R.Stewart(1962) : Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats',

JFM, Vol.13 pp.481-504. Ser.A,Vol.389 pp.241-258.

Takehito HORIE・Katsumi SEKI・Masaru MIZUGUCHI(2004): LONG PERIOD WAVES AND WAVE ENVELOPE IN SHALLOW

WATER DURING A STORE, Proc. of the 29th International Conference on Coastal Engineering 2004, World Scientific ASCE,
pp.1299-1307.