全国波浪観測データを活用したうねり性波浪の伝播特性について

Propagation Characteristics of Swell According to Recent Observations

加島寛章1•平山克也2•峯村浩治3•平石哲也2

Hiroaki KASHIMA, Katsuya HIRAYAMA, Kouji MINEMURA and Tetsuya HIRAISHI

Recently, the disaster that high waves attack any coastal area increases. For example, the caissons were moved by extreme forces of long period waves in Kuji port, Iwate Prefecture in 2006 or the boat was capsized by the high waves suddenly appeared in a calm weather in the Kurihama Bay, Kanagawa Prefecture in 2004. Such waves are caused by the swell propagated into the shallow water. In this study, the characteristics of the swell propagations along Japanese coast are classified by using 'TIME LAG' defined by cross-correlation analysis on swell data observed at several stations in NOWPHAS

1. 緒言

2000年以降,地球温暖化の影響によると思われる台風の 大型化や中心気圧の低下、集中豪雨の激化が進み、全国 各地において海岸構造物の損壊被害が多発している.中で も,波高は設計波より小さいが,10~30s程度の長い周期 の波浪(以下,うねり性波浪と表記)の来襲によるものが 増加している. 2006年9月5日に台風12号の通過に伴う うねり性波浪が久慈港半崎地区に来襲し、護岸の一部損 壊や護岸天端付近の約10mにわたる欠損,護岸からの越 波による浸水被害が発生した(Hiraishi ら, 2008). 当時 の波浪は、9月5日に八戸港で有義波高4.08m、有義波周 期17.0sを記録し、2003年改良時の設定値である H₀ = 6.0 m, T_{1/3}=12.6s より周期の長い波浪が来襲していた. また, 2007年9月7日に小田原に上陸した台風9号の来襲によ り神奈川県の西湘バイパスが延長1.1kmにわたって被災し、 砂浜が侵食され、道路擁壁直下の土砂が吸い出されて擁壁 が倒壊した、神奈川県平塚において被災時に観測された有 義波周期は14.2s であり、擁壁完成当時(1971年)に想定 されていた波浪周期 T=11s を上回るものであった(平石 ら, 2008).

一方,うねり性波浪は海岸構造物の損壊だけでなく,過 大なローリングによる係留船舶の荷役障害,網切れ被害, 荷役中の突然の動揺による港湾労働者の転落事故や漁船の 転覆事故等の船舶への影響も大きい.たとえば,2004年に 発生した台風2号の通過に伴う高波浪の連なりを含んだう ねりの来襲により,久里浜湾において小型漁船転覆事故が

1正会員	修(工)	(独)港湾空港技術研究所
2 正 会 員	博(工)	(独)港湾空港技術研究所
3 正 会 員	修(工)	(株)エコー

発生している. このように, 港湾施設の設計や係留船舶の 荷役限界等に影響を及ぼすうねり性波浪を考慮した高度な 港湾整備や波浪警報への早急な対応が今後, 必要となって くる.

そこで、本研究ではこのような台風の通過に伴ううねり 性波浪(波周期 $T = 10 \sim 30s$)に着目し、近年の全国港湾 海洋波浪情報網(以下、NOWPHAS と表記)により得ら れる波高データを有効に活用し、うねり性波浪の伝播特性 およびうねり性波浪と台風の関係性について解析的検討を 行った。

2. 解析の概略

うねり性波浪の伝播特性およびうねり性波浪と台風の関 係性を把握するため、全国の港湾で面的に取得された NOWPHAS波浪観測データ(たとえば、永井ら、2006; 清水ら、2007)により、観測地点間におけるうねり性波浪 の波高(以下,うねり成分波高と表記)の相互相関解析 を行った、以下に、相互相関解析の概略について説明する.

まず,解析に必要なうねり性波浪の波高データを選定する.NOWPHAS 波浪観測では観測された波浪は各周期帯の成分波に分類され、各周期帯の成分波高として整理されている.本研究では、NOWPHAS 波浪観測データの周期帯 $T_1 = 10.7 \sim 14.2s$ と $T_2 = 16.0 \sim 25.6s$ の成分波高を合成することにより10.7 $\sim 25.6s$ 程度のうねり成分波高を算出した(式(1)).

$$H_s(t) = \sqrt{H_{T_1}(t)^2 + H_{T_2}(t)^2} \tag{1}$$

ここで, H_{T_1} および H_{T_2} は各周期帯の成分波高(m), H_s はうねり成分波高(m),tは時間(h)である.解析対象範囲は各台風によるうねり成分波高が最大となる時刻の前後



(b) タイムラグの概念図(相互相関係数がMAX時)

図-1 うねり性波浪の諸要素概念図(○:基準観測地点の波 高データ,■:対象観測地点の波高データ)

3~5日間の期間に設定した.また,うねり成分波高が最 大となる時刻をうねり観測時刻と定義した(図-1(a)参照). ついで,式(1)で算出された2観測地点間の波高データ の時間軸をずらすことによってうねり成分波高の相互相関 をとる.本研究ではうねり性波浪の伝播に着眼点を置いて いるため,台風ごとに基準観測地点を設定し,うねり成分 波高に関して各観測地点との相互相関を解析した.すなわ ち,以下の算定式(式(2),式(3))により,2観測地点間 のうねり成分波高の相互相関係数を算出した.

$$C_{xy}(m) = \frac{\sum_{n=0}^{N-|m|-1} [x(m+n) - x_m] [y(n) - y_m]}{N-|m|} \quad (2)$$

$$C_{xy}^{norm}(m) = \frac{C_{xy}(m)}{\sigma_x \sigma_y} \tag{3}$$

ここで、*x*、*y* は各観測地点のうねり成分波高データ、 $C_{xy}(m)$ は*x*、*y* に対する共分散、*x*_m、*y*_m は*x*、*y* の平均 値、 σ_x 、 σ_y は*x*、*y* の標準偏差、 $C_{xy}^{norm}(m)$ は*x*、*y* に対す る相互相関係数、*N* は解析区間の全データ数、*m* は時間 軸のずれである. 2004年当時までの NOWPHAS 波浪観測 では、多くの地点で2時間ごとに20分間水位観測が行われ、 その水面波形データから有義波等の統計量が算出されるた め、時間軸の1つのずれ(*m*=1) は2時間に相当する.

最後に,式(3)により算出された相互相関係数が最大と なる時間軸のずれ(以下では,タイムラグと表記)を調べ る図-1(b)参照).言い換えると,このタイムラグを調べる ことにより,基準観測地点と各観測地点のうねり観測時刻 の時間差が表現されることになる.以上より,相互相関解 析では NOWPHAS 波浪観測データの周期帯別波高より観 測地点間のうねり観測時刻の時間差が算出される. 表-1 解析対象擾乱および台風経路パターン

Case	Pattern	Disturbances
1	日本海通過型	T0415, T0416, T0514
2-1	太平洋通過型(非上陸)	T0402, T0612
2-2	太平洋通過型(上陸)	T0422, T0511
3	台風縦横断型	T0404, T0423, T0709

3. 解析結果

2004年以降に日本沿岸に来襲した代表的な台風について, 各観測地点で得られたうねり成分波高の相互相関解析を行 い,うねり観測時刻のタイムラグを算定し,うねり性波浪 の伝播特性およびうねり性波浪と台風の関係性について考 察を行った.

(1) 解析対象擾乱の選定

台風の来襲に伴ううねり性波浪の伝播特性を把握するため、各地の港湾に被害をもたらした近年の代表的な台風を対象擾乱として取り上げた。台風の通過する経路により、うねり性波浪が来襲する様子は異なると考えられるため、本解析では3パターンの台風経路(Case1:日本海通過型、Case2:太平洋通過型、Case3:台風縦横断型)を設定した。さらに、太平洋通過型については、日本に上陸しない場合(Case2-1)と上陸する場合(Case2-2)の2つに分類した。 表-1に解析対象擾乱および台風経路パターンを、図-2に各台風経路パターンに属する代表的な台風の中心経路図を示す。紙面の都合上、代表的な台風として Case1ではT0416, Case2-1ではT0612, Case2-2ではT0511, Case3ではT0709を取り上げた。なお、台風の表示方法として、たとえばT0416'は2004年に発生した台風16号を意味する。

(1) うねり性波浪の観測時刻と台風経路の関係

図-3 は各代表擾乱に対し、相互相関解析を行った結果 得られた、基準観測地点に対する各観測地点のうねり観測 時刻のタイムラグである. 横軸はタイムラグ(h), 縦軸は 観測地点名である. タイムラグが正の値をとる場合は、基 準観測地点よりそのタイムラグ分だけ遅れてうねり性波浪 が観測されることを意味する.うねり性波浪の伝播を見る ため、基準観測地点は解析対象となる観測地点のほぼ中央 に位置する地点に設定し、T0416では石川県輪島港、T0612 では波浮港(大島), T0511ではアシカ島(横須賀), T0709では茨城県常陸那珂港に設定した。図中のバーのな い箇所はタイムラグが少なくとも2時間以内であることを 表している. また, 図-4 に示すのは、 基準観測地点のう ねり観測時刻にタイムラグを加算して求めた、各観測地点 のうねり観測時刻における台風の中心位置と観測地点の位 置関係である. □は観測地点, ○と実線は台風の中心位 置と経路, □と○を結ぶ破線は, 観測地点と, その地点で



図-2 代表的な台風の中心経路図(白線:台風の中心経路)

うねり性波浪を観測した時刻における台風の中心位置との 対応を示したものである.なお、台風と観測地点の位置関 係を表現する際に「通過」という言葉を用いるが、一般的 に日本に接近する台風は南から北へ移動するため、観測地 点の緯度に対して台風の中心位置の緯度が高い場合を「通 過後」、低い場合を「通過前」と表現する.

まず、台風が日本海を通過する場合(図-2(a))につい てみると、 基準観測地点の輪島港と福岡県玄界灘ではうね り観測時刻に1日のタイムラグがあり、玄界灘から石川県 金沢港にかけての各代表港湾では、輪島港に対するタイム ラグは 6~8 時間ずつ減少している (図-3(a)). また, 新 潟県直江津港や富山港,伏木富山港では輪島港に対する タイムラグは0であることから、これらの港湾では輪島港 での観測後少なくとも前後2時間以内にうねり性波浪が観 測されている. 同ケースの T0415や T0514でも同様の傾向 が見られ、長崎県伊王島から金沢港にかけての各代表港湾 の間で 6~8 時間の遅れを伴いながら日本海沿岸にうねり 性波浪が来襲している.また、図-4(a)において、各地点で のうねり観測時刻における台風の中心位置が観測地点の緯 度に対して高緯度に位置していることから、各観測地点で は台風の通過後にうねり性波浪が来襲していることがわか る.

一方,台風が太平洋を通過する場合は,各観測地点に よるうねり観測時刻の差違はほとんどなく,タイムラグは おおむね一定である.台風が上陸しない場合(図-2(b)) は,波浮港を基準観測地点としたうねり観測時刻のタイム



(d) Case3: T0709 (茨城県常陸那港)

図-3 観測地点におけるうねり観測時刻のタイムラグ(括弧 内は基準観測地点)

ラグは徳島県小松島港から静岡県清水港にかけては 8~14 時間,茨城県鹿島港から宮城県石巻港にかけては 0~2 時 間である(図-3(b)).図-4(b)より,四国から北海道にかけ





- (a) Case1: T0416







(d) Case3: T0709

図-4 うねり観測時刻の台風の中心位置と観測地点の関係(□:観測地点,●:うねり観測時刻における中心位置,実線:台 風の中心経路,□と●を結ぶ破線:うねり性波浪を観測した時刻における台風の中心位置と観測地点の対応関係)

てのほとんどの観測地点において台風が通過する前にうね り性波浪が来襲しており、小松島港と北海道十勝港では約 1日の時間差がある.また、台風が一旦上陸して再度太平 洋に抜ける場合(図-2(c))は、アシカ島を基準観測地点 としたうねり観測時刻のタイムラグは高知港から和歌山県 潮岬港にかけて14時間で一定であり、潮岬港から台風の上 陸地点である清水港にかけては 4~6 時間ずつ減少してい る (図-3(c)). これらの傾向と図-4(c)より, 台風が観測地 点に接近するにつれて台風の来襲時刻とうねり性波浪が観 測される時刻の差が小さくなることがわかる.

最後に、台風が日本列島を縦横断する場合(図-2(d)) は、うねり観測時刻のタイムラグは北関東(福島県小名浜 港)から北海道南部(十勝港)にかけて単調に増加してい る. 常陸那珂港で観測されたうねり性波浪は台風の進行の 後を追うように時間遅れを伴って東北各地で観測され、仙 台港や石巻港で半日、むつ小川原港や苫小牧港で約1日 経過した後にうねり性波浪が来襲していることがわかる (図-3(d)). 図-4(d)では、これらの傾向を裏付けるように 台風の進行とともに台風が観測地点に最も接近した時にう ねり性波浪を観測している.

このように、うねり性波浪の日本沿岸への来襲の様子は 台風の通過経路により異なり, NOWPHAS で観測された うねり性波浪データの相互相関解析結果を活用することに より、台風がどの経路を通過すると、どの地点でどのくら いの時間差をもってうねり性波浪が来襲してくるのかを予 測することが、ある程度可能になると考えられる.

(3) うねり性波浪来襲時の台風と観測地点の位置関係

図-5 に示すのは、前節のうねり性波浪を観測した時刻 における台風位置と観測地点の位置関係を全対象擾乱につ いてまとめたものである。横軸は対象擾乱を Case ごとに 並べ、縦軸は台風の中心位置と各観測地点の平均距離で ある. 図中の○は Case ごとの平均距離である. 図-5 より わかるように、台風が上陸せず日本海および太平洋上を通 過する場合(Case1, Case2-1)は、その距離は平均して40 0km 以上(特にCase2-1では600km 以上)であり、台風が 日本列島を縦横断する場合(Case2-2, Case3)は、台風 位置と観測地点の距離が平均して400km 未満である。図-3の観測地点ごとのうねり観測時刻のタイムラグの分布を 合わせて考えると、台風位置と観測地点の距離が比較的短 い場合(400km 以下; Case2-2 および Case3) ではタイム ラグは単調に増減し,長い場合(600km 以上; Case2-1) ではタイムラグは一定値をとる傾向にあることがわかる.

このように、台風の中心位置と観測地点の距離によりう ねり性波浪の観測時刻の現れ方が異なり、うねり性波浪の 来襲予測をする上では、観測時刻だけではなく観測地点と 台風の距離も重要な要素になりうると言える.

(4) うねり性波浪の発生波源の推定検証

前節までに NOWPHAS 観測地点で観測されたうねり成 分波高をもとにうねり観測時刻のタイムラグやうねり性波 浪観測時の台風と観測地点の位置関係を明らかにした.し かしながら、うねり性波浪がどこで発生して日本沿岸にど のように伝播するかは依然として不明である。そこで、簡 易的にうねり性波浪の発生波源および伝播方向を推定する ため、うねり観測時刻における波形データより方向スペク トル解析を行ってうねり性波浪の波向を推定し、うねり性 波浪の発生波源の推定を試みた.本推定では台風と観測地 点の距離が比較的長く、うねり性波浪の伝播過程の推定が 重要になると思われるケース(Case1とCase2-1)を取り上 げた. ただし、台風の規模(風速半径)を考慮していない ため、うねり性波浪の発生波源はうねり性波浪の波向線と 台風の中心経路の交点と定義した.

図-6 に示すのは、T0514 (Case1:日本海通過型), T0402 (Case2-1:太平洋通過型(非上陸)) に対してうね り性波浪の波向線と台風の中心経路の関係を表したもので ある. 図中の実線がうねり性波浪の波向線, 〇付き実線が 台風の中心経路である.日本海を通過する場合(図-6(a)) では、隠岐諸島周辺がうねり性波浪の発生波源とな



図-5 うねり観測時刻における台風位置と観測地点の距離 (バー:距離,○:平均値,左からT0415,T0416,T0514, T0402,T0612,T0422,T0511,T0404,T0423,T0709)

り、そこから日本海沿岸の各港湾に伝播している.一方、 太平洋を通過する場合(図-6(b))では、うねり性波浪 は台風の進行とともに発生し、それらが各地の港湾に来襲 していることがわかる.このように、うねり性波浪の波形 データからうねり性波浪の発生波源や伝播方向を簡易的に ある程度推定することが可能であることがわかった.しか しながら、この推定方法では NOWPHAS 波浪観測地点が うねり性波浪に対して浅海域に属していることによる屈折 の影響や台風の規模や風波情報等を考慮していないため、 その推定精度は決して高くなく、多くの課題が残っている.

3. 結論

本研究では、現地で観測されたうねり性波浪の伝播特性 を把握するため、NOWPHAS 波浪観測データの周期帯別 波高に注目し、うねり成分波高の相互相関解析を行った. その結果、台風が日本海を通過する場合、台風が通過して 半日から一日経ってうねり性波浪が日本沿岸に到達し、太 平洋岸のはるか沖を通過する場合では各観測地点でうねり 性波浪が観測される時刻の差(タイムラグ)は小さいこと がわかった.また、台風が日本列島を縦横断する場合では 台風の進行の後を追うようにうねり性波浪が時間遅れを伴っ て観測されることがわかった.このように、台風の通過経 路によりうねり性波浪の伝播特性に違いが見られることか ら、台風経路ごとにうねり性波浪の来襲予測を行うことは ある程度可能であると思われる.

一方,うねり性波浪の波高線と台風の中心経路からうね り性波浪の発生波源の推定を試みたが,今回は各観測地点 におけるうねり性波浪の屈折の影響や台風規模(風速半径)



(b) Case2-2: T0402

図-6 うねり性波浪の波向線と台風中心経路の関係(実践: うねり性波浪の波向線,○付き実践:台風の中心経路)

等を考慮していないため,現時点においてその推定精度は 決して高くない.今後は,各観測地点周辺の波浪変形計 算や台風の規模や風波場を考慮した波浪推算を行うことに より,うねり性波浪の発生波源やその伝播特性に関する推 定精度の向上を行いたいと考えている.

参考文献

- 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦(2007):全国港湾海洋波浪観測 年報(NOWPHAS 2005),港湾空港技術研究所資料,No. 1161,92p.(波浪観測年報は、1970年版以降毎年刊行)
- 永井紀彦・里見 茂(2006):全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2004),港湾空港技術研究所資料,No.1118, 15p.
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎(2008): 偶発波浪荷重による被害例とその特性,海岸工学論文集, 第55巻(印刷中).
- Hiraishi, T., K. Haruo, K. Hirayama, and K. Tanaka(2008): Application of new wave transformation model to harbor design, Submission to 2nd International Symposium on Shallow Flows (印刷中).