海洋上の離島港湾における 確率沖波及び作用波の算定手法

平山 克也¹・相田 康洋²・川口 浩二³・藤木 峻⁴
・峯村 浩治⁵・森谷 拓実⁶

¹正会員 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail: hirayama@pari.go.jp

² 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

³正会員 港湾空港技術研究所 海洋情報・津波研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail: kawaguchi@pari.go.jp

⁴正会員 港湾空港技術研究所 海洋情報・津波研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

⁵ 株式会社エコー 技術本部防災解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野二丁目6-4)

E-mail: minemura@ecoh.co.jp

⁶正会員 株式会社エコー 技術本部防災解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野二丁目6-4)

深海域に囲まれた特有な地形条件を有する海洋上の離島港湾では、波はほぼ全方位から来襲する。本研究では、沖縄本島の東約360kmの海洋上に位置する南北大東港に対して波浪推算及び波浪変形計算を行い、各岸壁に対する確率沖波及び作用波を効率的に算定する手法を示すとともに、その妥当性を海岸近傍で取得された擾乱時の波浪観測記録を用いて検証した。

波浪推算においては海洋上の孤島を取って海域とみなすことにより、逆に全方位の沖波の算定が可能となる。また、スペクトル法とのone-wayカップリングが可能なブシネスクモデルは、島による波の回折やトラップ効果を考慮した各岸壁への作用波だけでなく、岸壁上の越波浸水過程なども効率的に算定可能であるが、推算波を入力した沿岸波の再現計算では観測波高を過小評価する傾向がみられた。

Key Words : hindcasting, wave transformation, WAM, Boussinesq model, isolated Island

1. はじめに

深海域に囲まれた海洋上の離島に来襲する波を考える場合、ほぼ全方位の波向が対象となる。また、これらの沖波を定義する位置は、島自身による遮蔽の影響を受けない沖合で、島を囲む複数地点として選定される必要がある。仮に、これを波浪観測で行う場合には、いずれも大水深域での対応となるため、技術面または費用面で多大な困難を伴うことは想像に難くない。したがって、このような離島の沿岸構造物に対する設計沖波及び作用波の見積りには、波浪推算及び波浪変形計算が多用されることになるが、上述した海洋上の離島特有の地形条件のために、それらの適用に際しては、陸地の空間スケールが内地とは異なる離島特有の課題や効用が存在する。

そこで本研究では、沖縄本島の東約360kmの海洋上に浮かぶ南北大東島を対象として、両島のそれぞれ北、西、南に位置する岸壁への作用波とその沖波を推算・算定するとともに、適用上の留意点を明らかにした。また、これらを考慮した算定手法の妥当性について、特定の施設

整備のために海岸近傍で取得された擾乱時の波浪観測記録を用いて検証した。

2. 海洋における確率沖波の算定

(1) 対象海域における16方位別高波擾乱の抽出

周囲20.8kmの南大東島と周囲13.5kmの北大東島を含む海底地形を図-1に示す。-1500m級の深海域から急勾配で駆け上がる独特な地形ということもあり、この海域ではNOWPHAS等による継続的な沖波観測は実施されていない。そこで、再現期間10年程度の確率沖波を方位別に推定するために、まず港湾空港技術研究所が所有している常時波浪推算データベースのうち当該海域における過去10年間（2003年～2012年）を参照し、このうち各波向で波高が上位となる代表20擾乱を抽出した。

ここで、常時波浪推算データベースとは、気象庁から提供される客観解析値GPVに対してWAM Cycle 4による波浪推算を日本沿岸（第1領域）を対象に実施し、沖縄本島及び先島諸島を含む海域（第2領域）においては、

図-1 南北大東島周辺の海底地形

表-1 選定した代表20擾乱（2003年～2012年）

No.	擾乱名	期間	各年の1位
1	台風0310号	2003 08/05 16:00 - 08/09 21:00	○
2	台風0321号	11/22 00:00 - 12/06 13:00	
3	台風0406号	06/17 07:00 - 06/22 08:00	
4	台風0416号	08/20 20:00 - 09/01 03:00	
5	台風0418号	09/02 20:00 - 09/09 12:00	○
6	台風0423号	10/12 18:00 - 10/25 18:00	
7	冬型気圧配置	01/14 00:00 - 01/18 06:00	
8	台風0514号	08/29 08:00 - 09/08 06:00	○
9	冬型気圧配置	12/21 18:00 - 12/25 01:00	
10	台風0616号	10/01 08:00 - 10/11 08:00	
11	低気圧通過一冬型気圧配置	12/16 21:00 - 12/31 03:00	○
12	台風0704号	07/11 16:00 - 07/17 05:00	○
13	南岸低気圧	2008 05/11 02:00 - 05/21 07:00	○
14	台風0918号	2009 10/03 11:00 - 10/12 10:00	○
15	台風0920号	10/18 05:00 - 11/01 11:00	
16	台風1014号	2010 10/26 05:00 - 11/04 10:00	○
17	台風1106号	2011 07/15 14:00 - 07/22 06:00	○
18	台風1109号	07/31 09:00 - 08/10 01:00	
19	台風1215号	2012 08/21 23:00 - 08/30 13:00	○
20	台風1217号	09/25 11:00 - 10/02 05:00	

空間解像度 $1/8^\circ$ （約14km）の各計算格子上でone-wayネスティング計算を実施して算定される、有義波高・周期・波向を1時間毎に出力・整理したものである。この場合、大きさが格子間隔よりも小さい南北大東島地形は陸地として反映されないため、この格子での推算結果に対し最も近い沖縄本島南東側のNOWPHAS中城湾で採用されている高波基準（上限値：2.0m，下限値：1.5m）を適用すると、この海域では波向に関係なく10年間に381擾乱が抽出された。そこで、これらの各擾乱期間における16方位別の最大有義波高をそれぞれ降順に並び替え、方位別に上位1～3位及び各年の1位を採用するなどにより、各方位で上位の高波を発生させた代表擾乱を網羅的に抽出した。このように選定した20擾乱を表-1に示す。

(2) 海洋上の離島港湾を対象とした波浪推算

常時波浪推算における風から波のエネルギー輸送には波齢の影響を考慮したJanssenの理論を用いているが、擾乱時に適用すると波浪が過度に発達する場合があること

表-2 WAM Cycle 3による波浪推算の計算条件

(a) 計算領域の諸元

領域No.	対象海域	領域情報(左下隅、右上隅座標)	格子間隔	水深考慮の有無
第1領域	日本全域	左下隅座標: 北緯15.0°・東経115.0° 右上隅座標: 北緯63.0°・東経170.0°	0.5° (1/2°)	なし(深海)
第2領域	沖縄本島周辺海域 先島諸島周辺海域	左下隅座標: 北緯23.0°・東経122.5° 右上隅座標: 北緯30.0°・東経133.0°	0.125° (1/8°)	なし(深海)
第3領域	南北大東島周辺海域	左下隅座標: 北緯25.5°・東経126.5° 右上隅座標: 北緯29.0°・東経132.0°	0.03125° (1/32°)	なし(深海)

(b) 方向スペクトルの設定

方向分割数	32 ($\Delta\theta=11.25^\circ$)
周波数分割数	25 (最低周波数: $FR(1)=0.04177248\text{Hz}\approx 24\text{s}$)
風から波へのエネルギー輸送	Wuの式 ・波の発達が風速のみに依存する。 ・海面の状態を考慮していない(波齢の考慮なし)。
計算時間間隔	第1領域 900s 第2領域 300s 第3領域 60s
出力項目	有義波高、有義波周期、平均波向、方向スペクトル(9地点)
出力時間間隔	20分

図-2 擾乱時の波浪推算結果の比較（台風0418号）

が橋本ら¹⁾によって指摘されている。そこで本研究では、風から波のエネルギー輸送量の計算にWuの式を用い、さらに沖縄本島及び南北大東島を含む空間解像度 $1/32^\circ$ （約3.5km）の計算領域（第3領域）を設定した、WAM Cycle 3による波浪推算を改めて実施することとした。これらの計算条件を表-2に示す。

ここで、第3領域の空間解像度においては両島はそれぞれ1つまたは2つの計算格子で表現可能である。しかし、本研究では敢えてこれらの計算格子も海域とみなした。これは、両島の周辺がいずれも深海域であることを利用し、陸地による遮蔽の影響を受けない両島に対する全方位の沖波を両島の間地点で得るための工夫である。なお、高度10mの海上風は橋本ら¹⁾にならない、擾乱時の気圧・台風分布をもとに、大気境界層モデルまたは傾度風・台風ハイブリットモデルを用いて推定した。

例として、WAM Cycle 3及びCycle 4による台風0418号来襲時の高波推算結果を図-2に示す。波向については、波高が小さい（風速が弱い）場合に違いが大きくなる期間がみられるが、両者は概ね一致する傾向にある。しかし、波高については、その他の擾乱も含め、Cycle 4によ

る推算結果がCycle 3による推算結果よりも大きくなる傾向がみられた。さらに、NOWPHAS中城湾でこのとき観測されたピーク時（9/5 04:00）の波浪諸元は、波高7.81m、周期12.5mであった。位置や水深、周辺地形等が異なるため、南北大東島海域における推算結果をこの値と直接比較することは必ずしも適切でないが、それでもCycle 4により推算された最大有義波高16mはいささか大き過ぎるようである。したがって、Cycle 3による推算値のほうがより妥当と考えられる。

(3) 海洋上の離島港湾に対する確率沖波の推定

南北大東島海域における確率沖波の推定には、9種類の確率分布関数のうち、DOL基準及びREC基準を満足し、MIR値が最も小さいものを最適な分布関数とする、合田による極値統計解析法を用いた。なお、極値データには常時波浪推算データベースから抽出された381擾乱のうち表-1に示す20擾乱の推算値をCycle 3によるものに入れ替えた極大値資料を用いた。また、有効統計年数10年間の方角別の高波総数を得るために設定する下限値には、基本的にそれぞれ方角別の年最大値資料の第10位の波高値を採用した。しかしながら、データ採択率が目安とされる0.15を下回った波向N及びNNEでは0.15以上となるよう下限値を調整した結果、方角別の高波総数はそれぞれ19～53、データ採択率は0.16～0.44であった。

このようにして得られた波高の極値データを波向別に

図-3 南北大東島海域での10年確率沖波

(a) 北大東港 (b) 南大東港
図-4 南北大東港各地区の位置

極値統計解析し、得られた10年確率波諸元を図-3に示す。ここで、確率波高に対する周期は次式²⁾にて算定した。これは、波高と周期の相関解析を行い得た周期がすべて式(1)による値を上回り、物理的な妥当性を欠くと判断されたためである。

$$T_{1/3} \doteq 3.3(H_{1/3})^{0.63} \quad (1)$$

一方、南北大東港の各地区岸壁と南大東漁港各地区の位置を図-4に示す。両島とも、外郭施設を持たない各岸壁が波浪来襲頻度の高い島の東側を避けて配置され、特に、冬季風浪が卓越する時期には南側、台風時期には北側の岸壁が選択的に利用される。図-3はこれらの離島地形を考慮せずに算定されたが、これにより海洋上の深海域を対象とした波浪推算結果であるとみなせるため、このように1地点で全方位の沖波を推定することができる。なお、南北大東港の各岸壁では日常的に波高が高く接岸係留はほぼ不可能なため、岸壁沖に設けた2つの係留ブイを併用した岸壁近傍での係留荷役が行われている。

3. 海洋上の離島港湾に対する作用波の算定

(1) 海洋上の離島周辺の波浪変形計算

10年確率波に対するこれらの岸壁への作用波を算定するために、各方位の沖から島周辺の海底崖近傍までは回折を考慮したエネルギー平衡方程式法³⁾、海底崖沖から岸壁までは砕波・遡上・越波をも考慮できるブシネスクモデル⁴⁾を用い、かつ両者の接続境界ではone-wayカップリング⁵⁾を行うことにより、計算コストを抑制しつつ島による互いの遮蔽効果を考慮した全方位の波浪変形計算を実施した。例として波向Sのときの計算結果を図-5に示す。なお、潮位は全方位でH.W.L.(=D.L.+1.7m)とした。

図の上段には、図-3に示す沖波諸元のうち波向Sに対する方向スペクトルを南大東島沖から入力し、エネルギー平衡方程式法により算定された有義波高分布を示す。ここで、沖波の方向スペクトルは、修正ブレットシュナイダー・光易型周波数スペクトル及び方向集中度 $S_{max}=10$ とした光易型方向関数により生成した。また、波の周波数分割数は10、方向分割数は36(5°間隔)とした。このうち、破線で示した北大東島に対するブシネスクモデルの計算領域における、○印付実線で示したone-way接続境界上の各方向スペクトル(矢印による吹き出し)をみると、南大東島の遮蔽域から離れた東側では主波向に対しほぼ対称に波エネルギーが分布しているのに対し、遮蔽域に掛かる北大東島の正面ではW寄りの波エネルギーがみられなくなり、南大東島の直背後に位置する接続境界の西側ではS周辺の波エネルギーがみられなくなるなど、北大東島への入射波スペクトルに南大東島による遮蔽効果が適切に反映されている様子が確認できる。

図-5 one-wayカップリングによる波高分布の算定結果

一方、図の下段には、これらを入射し算定されたブシネスクモデルによる波高分布を示す。ここで、計算格子間隔は10m、時間差分間隔は $T_0/1000 \sim T_0/2000$ (T_0 は沖波周期)とし、波の伝播後 $100T_0$ の計算時間を確保した。また、接続境界上の各方向スペクトルに対する広範な成分波諸元に対応するため、成分波数は1024波とした。図より、北大東島では波向Sに対し島の西側で南大東島の遮蔽効果による波高低減がみられるものの、東側ではその効果は限定的である。また、北大東島自身の遮蔽効果が期待される島の北側では、これらの波が屈折・回折し、島周辺の幅100m～200m程度の浅瀬(水深-10m～-20m)によるトラップ効果と思われる波高増大が確認できる。

(2) 海洋上の離島岸壁における卓越波向

図-5に例示したone-wayカップリングによる波浪変形計算を全16方位に対して実施し、南北大東港の各岸壁の沖約150mに設けた、2つの係留ブイのほぼ中間位置(水深-20m～-25m程度)で算定された有義波高を整理した結果を、沖波諸元とともに島ごとに重ねて図-6に示す。ここで、岸壁を含む島の海岸線による波の反射は、ブシネスクモデルに導入された遡上・越波モデルにより斜面上

図-6 各方位に対する南北大東港の各岸壁沖での算定波高

図-7 岸壁上の越波浸水過程の計算例(北大東港西地区)

の波浪変形に応じて自動的に再現されるものと仮定し、水陸境界には完全反射境界のみを設定していることに注意されたい。

南北大東港各地区の位置を示した前掲の図-4を参照すると、基本的には各岸壁ともほぼ正面から来襲する波による波高が相対的に大きい様子が見てとれる。特に、北大東港では北・西地区、南大東港では西地区において沖波とほぼ同等な波高が算定され、遮蔽等の影響を受けない沖波がそのまま来襲すると考えられる。一方、北大東港の江崎地区及び南大東港の北地区では、それぞれ前方の島による遮蔽効果を受けて来襲波高が幾分低減され、卓越波向が変化する。なお、S系の波が遮蔽を受けずに来襲する南大東港亀池地区で波高が低減する原因は、沖波波高が大きいために浅瀬上で碎波が生じたためである。

(3) 海洋上の離島岸壁における越波浸水過程

10年確率波に対する各岸壁での越波浸水過程を詳細に再現するために、岸壁周辺の標高等も反映させた計算格子間隔5mの地形データを用い、図-6において○印で囲った波向に対するone-wayカップリングによる越波計算を実施した。ただし、計算範囲は岸壁を含む1.5km×3km程度とし、ブシネスク計算の効率化を図った。なお、計画中を含む各岸壁の諸元はどれもほぼ同様であり、岸壁長100m、前面水深DL-7.5m、岸壁天端高DL+6.0mである。岸壁への越波状況の計算イメージを図-7に示す。

ところで、用いた越波モデルによる1次元の計算精度は平山・長谷川⁴⁾による検証例を参照できるものの、平面2次元波浪場での計算精度の検証は未だ十分でない。

図-8 岸壁上の平均越波流量の再現性（南大東港西地区）

(a) 岸壁の平面図（排水路あり）と最大浸水深

(b) 平均浸水深の時間変化

図-9 越波による岸壁上の浸水状況（南大東港西地区）

そこで、本研究では別途、高山ら⁹⁾による越波流量算定式の近似式を用いて岸壁上の各計算格子における平均越波流量を算定し、越波モデルによる正の（岸壁へ乗り上げる）越波流量の平均値と比較した。ここで、近似式を適用する際に必要となる岸壁前面水深に対する換算沖波波高は、岸壁を含む海岸線からの反射波が生じないよう陸側に十分な幅のスポンジ層を設置したブシネスクモデルによる波浪変形計算を別途実施し、得られた岸壁前面での進行波高を合田による碎波帯内波高⁷⁾で割り戻して算定した。

計算結果の一例を図-8に示す。越波モデルによる計算値は、岸壁の両端部で近似式による推定値を若干上回るものの、両者は比較的良好に一致している。なお、両者にみられる空間的な微変動は、岸壁法線を階段状に近似したことによる影響と思われる。一方、その他の岸壁での越波量も概ね $10^{-1} \sim 10^2 \text{ m}^3/\text{m}$ 程度であり、計算値は推定値に対し、島の北側では若干過小、島の南側では若干過大となるものの、高々1オーダー以内の違いであった。

さらに、ブシネスクモデルで計算される同じ岸壁上の浸水状況について、最大浸水深の空間分布及び平均浸水深の時間変化を図-9に示す。この岸壁奥の2辺には排水路が設けられているため、これを考慮した地形データ（排水路あり）では、岸壁上に打ち上げられた越波水塊

は、岸壁法線のみならず岸壁の北側端に設けた排水口からも岸壁沖へと排水される。そのため、岸壁上の最大浸水深は越波が生じる岸壁法線近傍で大きく、岸壁奥へ進むにつれて小さくなっている。なお、実際の排水路幅は用いた計算格子幅(5m)よりも狭いため、流路を確保しつつ1格子を配した地形データにおいては、断面積を一致させるよう排水路床を底上げした。一方、岸壁上の平均浸水深は、排水路なしとした場合にも越波が継続するにつれて時間平均値に対する変動幅が小さくなるものの、排水路ありでは、より浅い浸水深で岸壁上の総越波量と総排水量が均衡することが確認できる。

4. 離島周辺の波浪推算・変形計算の精度検証

(1) 南大東漁港沖での観測データとその再現計算

前章までに実施した波浪推算とone-wayカップリングによる波浪変形計算の妥当性を検証するために、表-1の通り選定した代表20擾乱のうち、南大東漁港南大東地区あるいは北大東地区（図-4参照）沖の水深約20m地点で波浪観測データが取得された12擾乱を対象として、本手法による再現計算を改めて実施した。なお、本研究で入手できた範囲では、南大東地区では少なくとも2001年1

図-10 南大東漁港各地区での観測データ（台風1217号）

図-11 南大東漁港各地区での観測波高に対する再現性（印内側の色が薄いほど島の遮蔽効果が大いことを示す）

月から、北大東地区では2010年1月から、毎正時の有義波高・周期及び平均波向に関する観測値が整理されていることを確認した。例として、両地区で観測データが得られた台風1217号による波高、周期、波向の時系列変化を、WAM Cycle 3及びCycle 4による推算結果と合わせて図-10に示す。さらに、WAM Cycle 3による波高ピーク時を対象としてブシネスクモデルにより算定された、各地区の波浪観測地点におけるこれらの計算値を重ねて示す。

図より、WAM Cycle 3により推算されたピーク時の波向はSからWへと徐々に変化し、これに伴い、観測波高は北大東地区で先にピークを迎え、その後、南大東地区で急激に高くなる様子が確認できる。また、沖波波高のピーク時において、ブシネスクモデルによる再現計算結果は、波高はやや過小評価、周期はやや過大評価ながら、波向も含め、南大東漁港沖の海底地形による波浪変形後の観測値を比較的良く説明できていることがわかる。

(2) 各擾乱での観測波高に対する再現性

対象とした12擾乱に対する本計算手法によるピーク時の有義波高の再現性を検証した結果を、図-11に示す。図より、one-wayカップリングされたWAM Cycle 3及びブシネスクモデルにより算定された各地区の有義波高は、観測波高を概ね再現できているものの、観測地点に対し島の真裏から波が来襲することを示す白抜き印の擾乱では、算定波高は明らかに過小である。また、観測地点が島の遮蔽域に掛かることを示す薄く塗り潰した印の擾乱でも、算定波高は同じく過小傾向にあることがわかる。したがって、本算定手法では島による回折やトラップ効果を過小評価する傾向が認められるが、今後、この原因を明らかにするためには、沖で推算された波高、周期、波向の妥当性についても合わせて確認する必要がある。

5. おわりに

本研究では、擾乱時の波浪推算法とone-wayカップリングによる波浪変形計算法を用いて、海洋上の離島特有の地形条件を考慮しつつ離島港湾における全方位の確率沖波及び作用波を効率的に算定する手法を示した。また、海岸近傍で取得された擾乱時の波浪観測記録を用いて、その妥当性を検証した。再現計算における島による回折やトラップ効果の過小評価傾向について、沖波の推算精度との関係を明らかにすることが今後の課題である。

謝辞：本研究は、内閣府沖縄総合事務局の委託により実施したものである。また、現地の地形データ及び観測データの取得に当たっては、沖縄県のご担当者に大いにご尽力いただきました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋本典明, 鈴山勝之, 永井紀彦: 2004 年に発生した台風に伴う高波の推算, 港空研資料, No.1102, 46p, 2005.
- 2) Goda, Y.: Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.129, No.2, pp.93-95, 2003.
- 3) 間瀬 肇, 高山知司, 北野利一, 森安里夫: 位相平均波浪変形解析モデルへの回折効果のモデリングと適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.66-70, 1999.
- 4) 平山克也, 長谷川巖: ブシネスクモデルによる護岸越波・浸水過程に関する再現計算, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67, No.2, pp.I_262-I_267, 2011.
- 5) 平山克也, 岩瀬浩之, 加島寛章: 任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.011-015, 2010.
- 6) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港研報告, 第 21 巻, 第 2 号, pp.151-205, 1982.
- 7) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp.59-106, 1975.

(2016.3.16 受付)

HINDCASTING AND CALCULATION FOR TRANSFORMED WAVES ON TOPOGRAPHY OF ISOLATED ISLANDS IN OCEAN

Katsuya HIRAYAMA, Yasuhiro AIDA, Koji KAWAGUCHI, Takashi FUJIKI,
Koji MINEMURA and Takumi MORIYA

For an isolated island surrounded deep sea in ocean, offshore waves come in any direction due to its peculiar bathymetry. In this study, an applicable method to conduct both wave hindcasting and calculation of wave transformation efficiently is suggested in order to estimate the design waves for each berth in such isolated islands. Moreover, the calculation accuracy is verified with some data observed near a coast.

It is better that topography of isolated islands is neglected in calculation grid for wave hindcasting because offshore waves in all direction can be estimated without wave diffraction due to neighbor islands. A Boussinesq model coupled on to a spectral method can reproduce both wave transformation from offshore to coast and wave overtopping on a berth, though wave heights are little underestimated to observed data.