

気象擾乱時の波浪推算精度に関する基礎的検討

A BASIC STUDY ON THE PRECISION OF ESTIMATED WAVE HEIGHT UNDER STORMY ATMOSPHERIC PHENOMENA

横田雅紀¹・児玉充由²・橋本典明³・田中雄太⁴・春元崇志⁵・河合弘泰⁶
 Masaki YOKOTA, Mitsuyoshi KODAMA, Noriaki HASHIMOTO,
 Yuta TANAKA, Takashi HARUMOTO and Hiroyasu KAWAI

¹正会員 工修 九州大学助教 工学研究院環境都市部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

²九州大学 工学府海洋システム工学専攻 (同上)

³フェロー 工博 九州大学教授 工学研究院環境都市部門 (同上)

⁴学生会員 九州大学工学府 海洋システム工学専攻 (同上)

⁵正会員 神戸市役所 (〒650-8570 神戸市中央区加納町6丁目5番1号)

⁶正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海洋情報研究領域長心得
 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

A third generation wave model “WAM”, widely used in the world, sometimes overestimates wave height especially under severe stormy condition. In such cases, the cause of the overestimates are said to be due to the error of estimated winds. On the other hand, the energy transfer from winds to waves under strong wind conditions is not clarified so far. In this study, relation between the factor of stormy atmospheric phenomena and wave height is investigated by case study, and characteristics of waves estimated by WAM are examined for various conditions through numerical simulations. As a result, it is noticed that the estimated wave heights by WAM are higher than those of observations when wind speed is faster than 15m/s. In the cases of model typhoon simulations, the estimated wave height is higher than any other case when typhoon speed is about 60km/h. It is also found that the wave height hind casting with rough grid is estimated lower than that with fine grid.

Key Words : WAM, typhoon, wave height, case study, numerical simulation

1. はじめに

第3世代波浪推算モデル WAM は世界各国で幅広く使用されており, 設計波の算定業務においても数多くの実績を有している. このため, 気象擾乱時の推算波高が観測波高に比べて過大となった推算事例については, 気象の再現精度に課題があると考えられてきた. しかしながら, WAM のソース項の中で風から波へのエネルギー輸送項は, 概ね風速 25m/s 以下の風データに基づいて検討されたものであるため, 大災害をもたらす超強風での推算精度には疑問も残る¹⁾. 本研究では, 気象は精度良く再現されているものと仮定し, 過去に推算波高が過大に推算された気象擾乱事例を整理することにより, 推算精度に影響を与える気象条件について検討するとともに, 一方向風やモデル台風を用いて超強風の気象擾乱の場を簡便に再現し, 台風移動速度, 格子間隔, エネルギー入力項の違いによる波浪推算モデルの応答特性について検討した結果について述べる.

2. 既往の事例に基づく検討

(1) 事例の整理

本検討では 1970 年から 2002 年における気象擾乱事例の中で, 東日本の何れかの地点で推算波高が過大となる 33 ケースを対象とした(表-1). 比較の対象とした全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の観測地点は図-1 に示すとおりである.

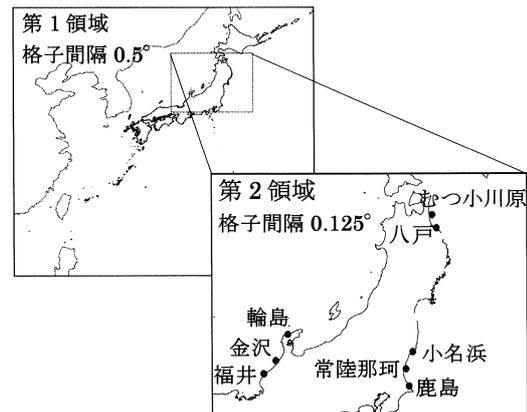


図-1 計算領域と観測地点

波浪推算は WAM を用い、気象庁が提供する天気図をもとに、台風モデルと傾度風モデルを組合せたハイブリッドモデルにより外力条件となる海上風データを作成し、深海条件として図-1 の第 1 領域から第 2 領域へと接続計算を行った。一例として、ケース 28 の輪島における波高と風速の経時変化を図-2 に示す。このケースでは風速の発達に伴い、推算波高、観測波高ともにほぼ同時に増大しているが、増大後の波高は推算値が過大となっている。

表-1 対象とした気象擾乱

	擾乱期間	気象要因
1	1970 1/30~2/3	冬型気圧配置
2	1971 1/3~1/6	東方海上低気圧
3	1971 4/28~5/1	二つ玉低気圧
4	1972 8/4~8/8	台風 7213 号
5	1972 9/16~9/19	台風 7220 号
6	1977 8/19~8/28	台風 7708 号
7	1979 5/13~5/16	オホーツク海気団
8	1979 10/18~10/22	台風 7920 号
9	1980 3/7~3/11	冬型気圧配置
10	1981 8/21~8/25	台風 8115 号
11	1982 4/8~4/12	日本海低気圧
12	1983 3/31~4/3	二つ玉低気圧
13	1984 1/3~1/5	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
14	1985 2/7~2/12	二つ玉低気圧
15	1986 3/21~3/26	南岸低気圧及び冬型気圧配置
16	1989 3/19~3/24	二つ玉低気圧及び冬型気圧配置
17	1989 8/3~8/9	台風 8913 号
18	1990 8/8~8/11	台風 9011 号
19	1990 11/27~12/2	台風 9028 号
20	1990 12/10~12/12	日本海低気圧及び冬型気圧配置
21	1990 12/26~12/29	日本海低気圧及び冬型気圧配置
22	1991 2/14~2/20	二つ玉低気圧
23	1992 1/31~2/2	南岸低気圧
24	1993 1/23~1/28	南岸低気圧及び高気圧の縁辺
25	1993 8/24~8/28	台風 9311 号
26	1994 2/20~2/22	二つ玉低気圧
27	1996 2/5~2/7	二つ玉低気圧→冬型気圧配置
28	1997 1/5~1/9	気圧の通過→冬型気圧配置
29	1998 2/27~3/4	南岸低気圧
30	1998 9/14~9/17	台風 9805 号
31	2001 1/7~1/11	東方海上低気圧
32	2001 1/24~1/29	東方海上低気圧
33	2002 1/20~1/24	冬型気圧配置

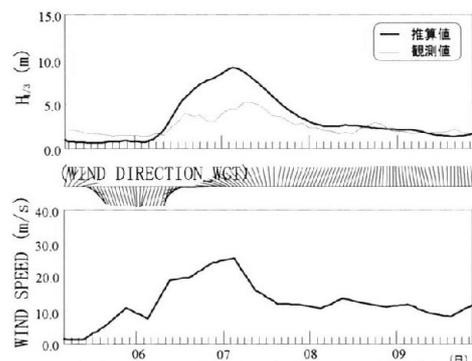


図-2 波高及び風速の経時変化例 (輪島)

(2) 風速別の推算精度

図-3 は地点別に全 33 ケースについて、風速 (推算値) と同時刻の波高を比較したものである。全地点とも風速の増大とともに波高が増大する傾向がみられる。この傾向は推算波高では明瞭に確認できるが、観測波高については風速の増大に伴って波高がばらつく傾向がみられる。特に太平洋側では低風速においても観測波高がばらつく傾向がみられた。

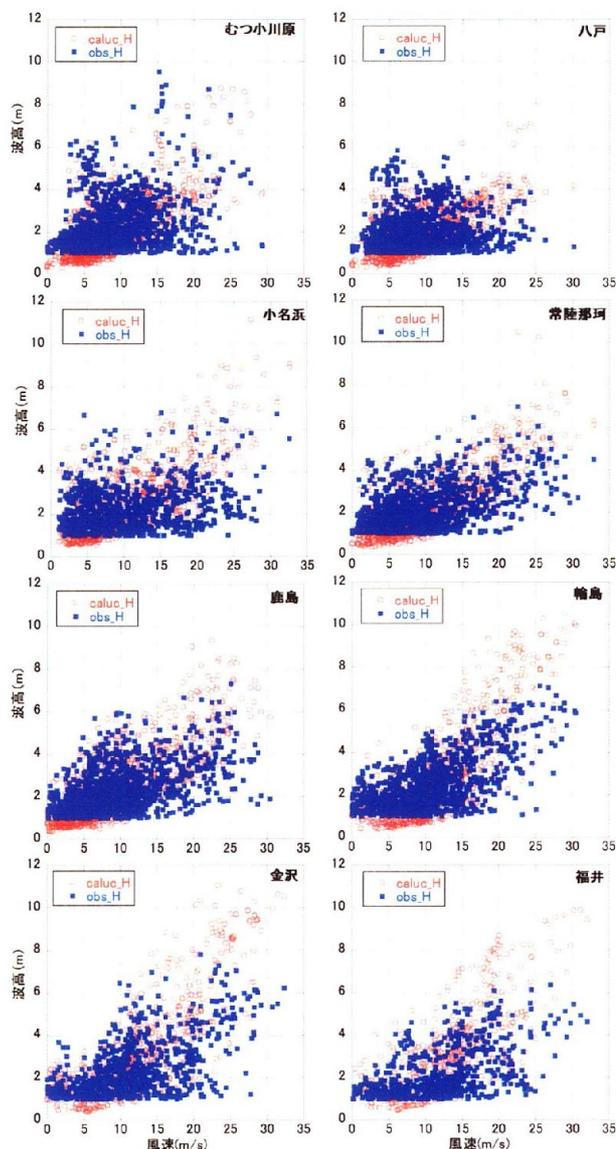


図-3 風速と波高の比較

図-4 は風速と同時刻の波高差 (推算波高 - 観測波高) を比較したものである。各地点とも風速の増加に比例して波高差が増加する傾向があり、風速 15m/s 程度では精度良く推算されるものの、強風速下では推算波高が過大となる様子が伺える。地点別にみると東北太平洋側では波高差は比較的小さく、北関東太平洋側や日本海側で波高差が大きくなるケースが多くみられた。

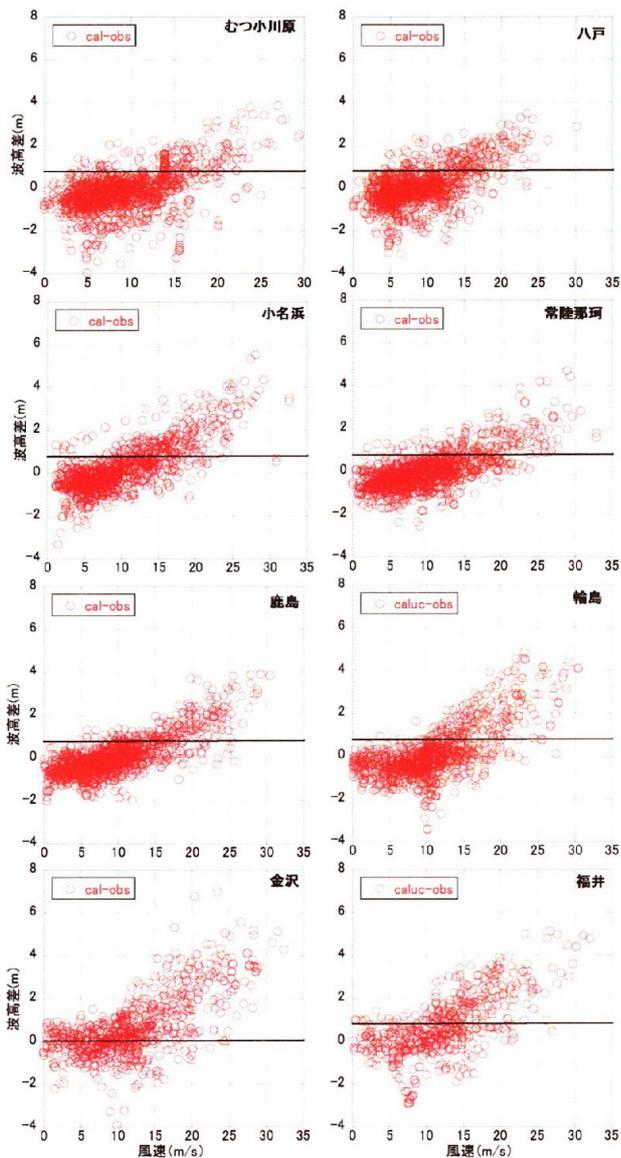


図-4 風速と波高差の比較

(3) 台風の移動速度と推算精度

対象とした気象擾乱のうち気象要因が台風である10ケースについて、台風の移動速度と推算精度の比較を行った。台風の移動速度は表-2に示すとおりであり、気象庁HPで提供されているベストトラック (<http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>) をもとに、台風の中心が北緯 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、東経 $135^{\circ} \sim 145^{\circ}$ の範囲に入った箇所から範囲を出た箇所までの直線距離を滞在時間で除することにより算出した。

台風の移動速度とピーク波高の比較及び、台風の移動速度と波高差の比較を図-5に示す。ここでは擾乱期間における波高の最大値をピーク波高とし、推算波高と観測波高のピーク波高の差を波高差（推算波高－観測波高）とした。東北太平洋側では移動速度が $40 \sim 50 \text{ km/h}$ のケースで推算波高、観測波高ともに高い傾向にあるものの、波高差は移動速度が 30

$\sim 40 \text{ km/h}$ のケースで大きくなっている。北関東太平洋側では台風の移動速度が $30 \text{ km/h} \sim 60 \text{ km/h}$ のケースで推算波高、観測波高が高く、移動速度が $30 \sim 40 \text{ km/h}$ のケースで特に推算波高が高くなっていた。波高差は移動速度が $30 \sim 40 \text{ km/h}$ のケースで大きくなる傾向がみられた。日本海側では台風の移動速度が大きいほど、推算波高、観測波高ともに大きくなる傾向がみられ、波高差は移動速度が $30 \sim 40 \text{ km/h}$ 及び 88 km/h のケースで大きくなっていた。

表-2 台風の移動速度

	気象要因	移動速度 (km/h)	移動距離 (km)	滞在時間 (h)
4	台風 7213 号	24.5	1,176	48
5	台風 7220 号	14.4	1,212	84
6	台風 7708 号	18.3	880	48
8	台風 7920 号	88.2	1,587	18
10	台風 8115 号	44.7	1,342	30
17	台風 8913 号	31.4	1,317	42
18	台風 9011 号	34.9	1,676	48
19	台風 9028 号	46.2	1,941	42
25	台風 9311 号	32.7	1,667	51
30	台風 9805 号	56.2	1,855	33

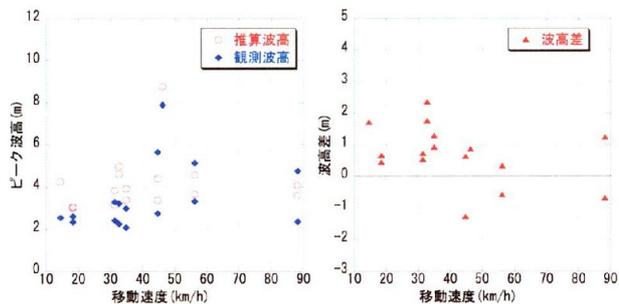


図-5(1) 台風移動速度と波高の比較（東北太平洋側）

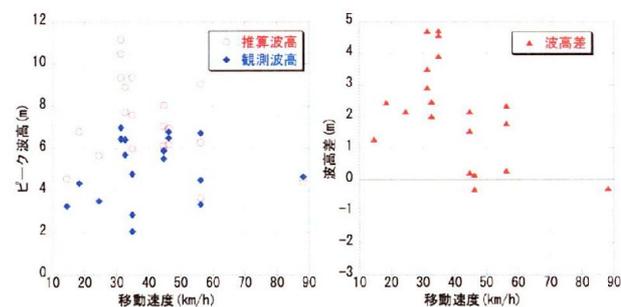


図-5(2) 台風移動速度と波高の比較（北関東太平洋側）

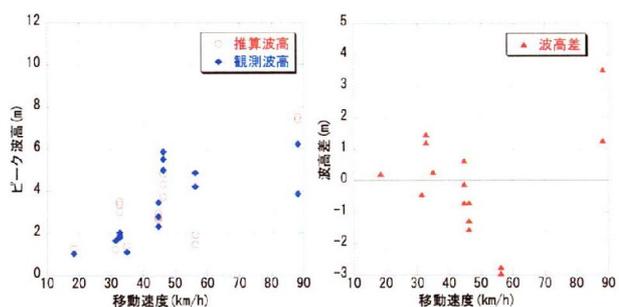


図-5(3) 台風移動速度と波高の比較（日本海側）

3. WAM を用いた超強風下の数値実験

(1) 計算条件

波浪推算の対象海域は 20 度×20 度の陸地がない深海を仮定し、計算領域の中心を台風が南から北へ直進する条件について、台風の移動速度、格子間隔、エネルギー入力項を変化させ、図-6 に示す 9 地点で波浪推算結果の比較を行った。入力条件となる海上風については、台風を中心気圧を 950hPa、Myers の式における最大風速域の半径を 100km で一定とし、台風モデルにより推算を行った。なお、エネルギー入力項が Janssen の式、格子間隔が 0.125 度、台風の移動速度が 50km/h の条件を基本条件とした。

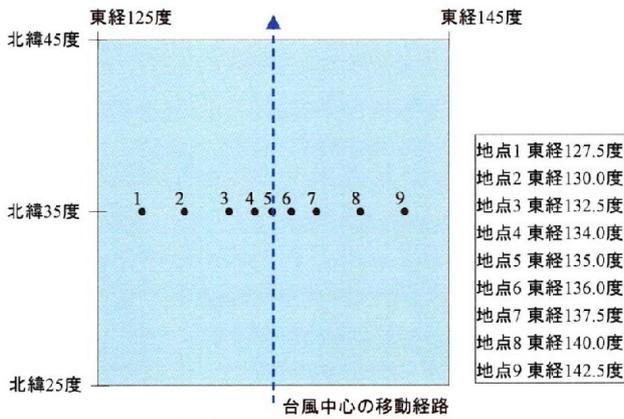


図-6 計算領域と比較地点

図-7 は基本条件での波浪推算結果について、地点5での風速の時間的発達・減衰が同程度で、風向が一定（南風）な風場を作成し、波浪推算を行った結果と比較したものである。比較のため、移動速度 25km/h の台風についても同様の検討を行った。移動速度 25km/h の台風との比較では、一方向風の場合に最大波高が 5m 以上高く推算されているのに対し、移動速度 50km/h の台風との比較では、同程度の最大波高が推算された。このことから、台風のように風場が急変するケースにおいては、同規模の風速で風向を一定とした条件と同程度の波高が推算される地点が存在することがわかる。

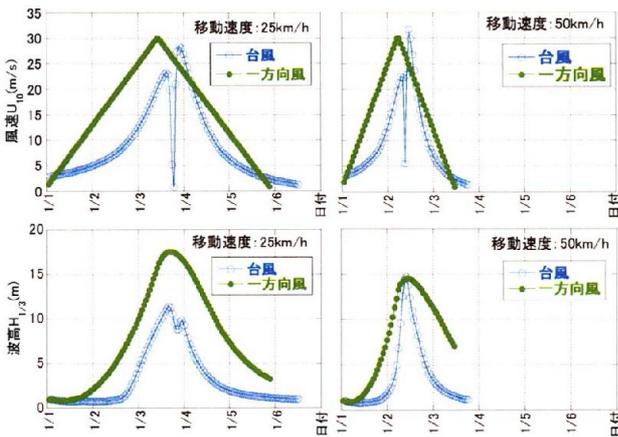


図-7 一方向風との比較（上段：風速，下段：流速）

(2) 台風移動速度について

基本条件について台風の移動速度を 12.5km/h から 87.5km/h まで 12.5km/h 間隔で変化させ、モデルの応答特性について検討を行った。図-8 は地点 6 における風速及び波高の経時変化を比較したものである。移動速度の速い台風から順にピークに到達しており、移動速度が速いほど大きな風速が発生しているが、ピーク波高が最も大きいのは移動速度 62.5km/h の台風であり、移動速度 75km/h 以上ではピーク波高が減少する傾向がみられた。図-9 はピーク波高を比較したものである。台風を中心よりも西側の地点では移動速度の違いによる波高の違いは小さく、台風を中心及び中心より東側で移動速度による推算波高の差が大きくなる傾向がみられた。

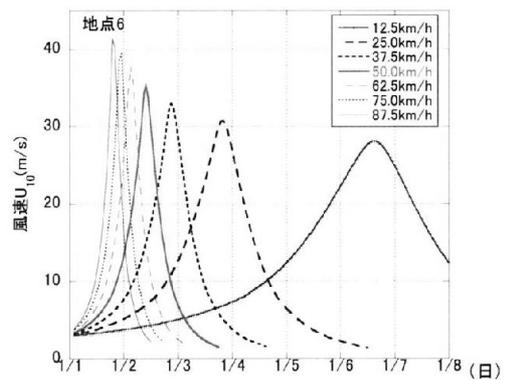


図-8(1) 風速経時変化（台風移動速度の比較）

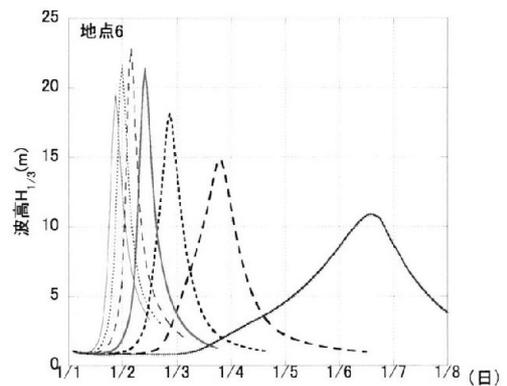


図-8(2) 波高経時変化（台風移動速度の比較）

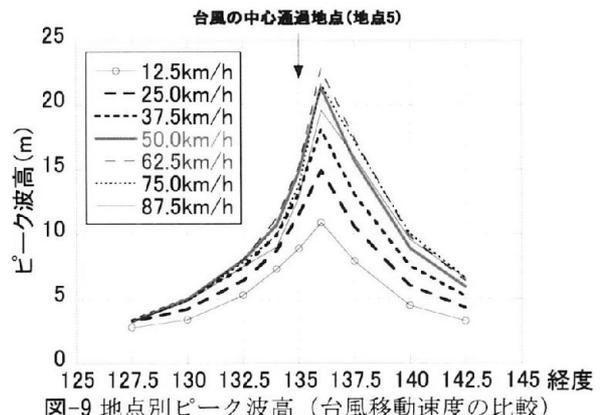


図-9 地点別ピーク波高（台風移動速度の比較）

(3) 計算格子間隔について

気象擾乱時は風向・風速が時空間で急変するケースが多く、格子内の平均値として推算される波高は計算格子幅の違いにより差が生じるものと考えられる。そこで、基本条件について計算格子間隔を 0.5 度、0.25 度、0.125 度、0.0625 度の 4 通りで波浪推算を行い、その影響を検討した。地点 5 における波高の経時変化を図-10 に示す。格子間隔が大きいほど推算波高のピークが小さくなる傾向がみられる。

図-11 は格子間隔毎に地点別のピーク波高をプロットしたもので、図-12 は格子間隔毎に格子間隔 0.0625 度でのピーク波高との差を地点別にプロットしたものである。比較のため、移動速度 25km/h の台風についても併せて示している。台風の移動速度が比較的大きい 50km/h のケースで格子間隔による推算波高の差が大きく、台風が通過する地点 5 で特に顕著であった。

外洋の波浪推算では格子間隔 0.5 度程度で推算されるケースが多く、格子間隔内の平均値が推算波高として算出されるものと考えられるが、沿岸域で波浪推算を実施する場合には複雑な地形を表現するため、格子間隔 0.125 度で波浪推算を実施するケースが多いものと考えられることから、台風の中心付近が通過する海域では、格子間隔の影響を受け、外洋と比較して過大な推算値となることが懸念される。

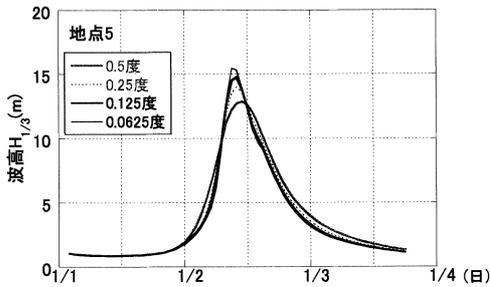


図-10 波高経時変化（格子間隔の比較）

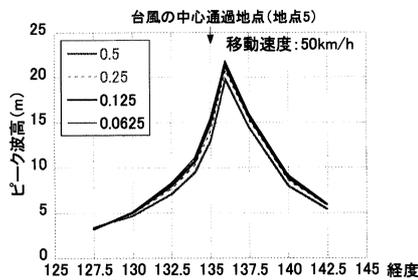


図-11(1) 地点別ピーク波高（移動速度 50km/h）

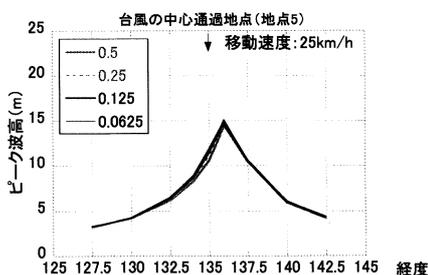


図-11(2) 地点別ピーク波高（移動速度 25km/h）

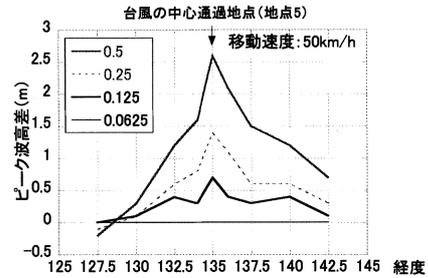


図-12(1) 地点別ピーク波高差（移動速度 50km/h）

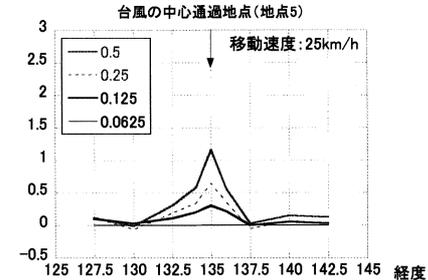


図-12(2) 地点別ピーク波高差（移動速度 25km/h）

(4) エネルギー入力項について

WAM Cycle-4 で用いられている Janssen の式は、WAMCycle-3 で用いられている Wu の式よりも波高が過大に推算される傾向があることが指摘されている²⁾ことから、基本条件についてエネルギー入力項に Janssen および Wu の式を用いて推算を行った。

図-13(1) は波高の経時変化を比較したものである。従来から指摘されているように Janssen の式を用いた場合に Wu の式に比べて波高が高く推算されることが確認された。図-13(2) は各地点におけるピーク波高を比較したものである。比較のため、移動速度 25km/h の台風についても併せて示している。

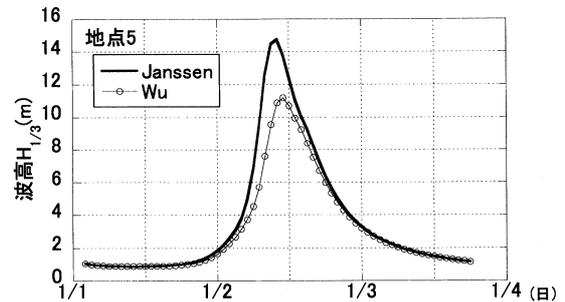


図-13(1) 波高経時変化（エネルギー入力項の比較）

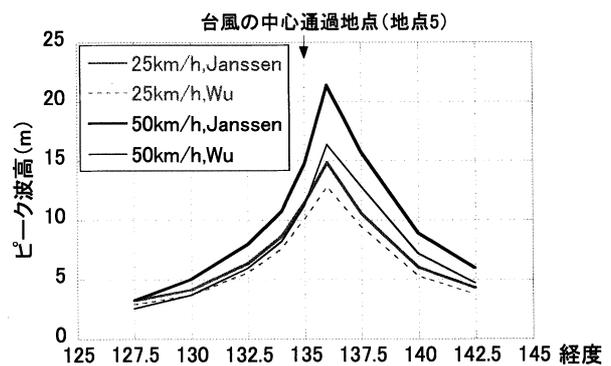


図-13(2) ピーク波高比較（エネルギー入力項の比較）

図-14 はエネルギー入力項の算出式の違いについて、定常風が吹き続けた場合の推算波高を地点 5 (吹送距離 1,000km) で比較したものである。広範囲で長時間にわたり強風速が続く条件であり、現実的な設定ではないが、風速 15m/s 以上では推算波高の差が次第に大きくなっていることがわかる。

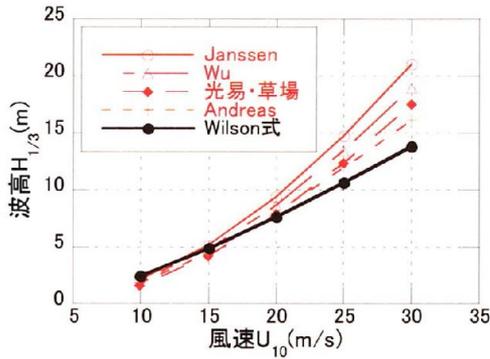


図-14 エネルギー入力項別の推算波高 (定常風)

それぞれの算出式による風速と海面抵抗係数の関係を図-15 に示す。Wu 及び光易・草場は風速に比例する式、Andreas は強風速下で海面抵抗係数の増加が低減する式を提案している。Janssen の理論式は風速のみで一義的に決まる関数ではないため、図には示していない。

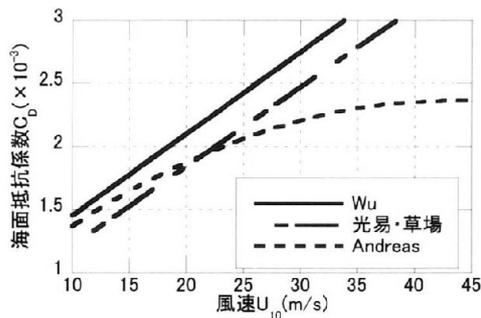


図-15 海面抵抗係数の算出式

Wilson 式は数多くの実験値や観測値を整理してまとめた波高・周期の算定式であり、標準的な波浪推算式として用いられている。

$$\frac{gH_{1/3}}{U_{10}^2} = 0.30 \left[1 - \left\{ 1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right\}^{-2} \right] \quad (1)$$

ここで g は重力加速度、 F は吹送距離(m)、 U_{10} は風速 (m/s)、 $H_{1/3}$ は有義波高(m)を表す。

4. おわりに

推算波高が過大となる気象擾乱事例を対象として

気象条件との比較を行った結果、風速 15m/s 程度では精度良く推算されているものの、強風速下では推算波高が過大となる傾向が確認された。また、台風の移動速度が 30km/h ~ 40km/h 付近で推算波高が最も過大になる傾向がみられた。

超強風下の波浪推算について、数値実験を行い、推算波高が過大となりやすい条件について検討した結果、台風を中心付近が通過する場合には、台風の移動速度や計算格子幅の違いが強く影響することが明らかとなった。さらに、定常風での検討により、風速 15m/s 付近ではエネルギー入力項の算出式によらず、同程度の波浪推算結果が得られるが、強風速下では推算結果に差が生じることを確認した。

風場の急変が推算波高に与える要因については、方向スペクトルに基づく詳細な検討が必要と考えられる。また、強風下における海面抵抗係数については、いずれの算出式とも外挿によって与えられていると考えられることから、現時点で精度が高い算出式を特定することは出来ないが、WAM にデータ同化手法を適用し、既に観測されている波浪データから強風下の海面抵抗係数を明らかにすることで波浪の推算精度が向上するものと考えられる。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 (20360222) 代表者：橋本典明の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Powel, M.D., Vickery, P.J and T.A. Reinhold: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, Nature, 422, pp.279-283, 2003
- 2) 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, 港湾空港技術研究所資料, No.1102, pp.7-8, 2005
- 3) 橋本典明, 川口浩二: 波浪推算モデルとその利用, 海洋開発論文集, Vol.19, pp.53-58, 2003
- 4) H.Mitsuyasu, T.Honda: Wind-induced growth of water waves, J. Fluid Mech., vol.123, pp.425-442, 1982
- 5) Andreas E. L.: An algorithm to predict the turbulent air-sea fluxes in high-wind, spray conditions, 12th Conf. on interaction of sea and atmosphere, CD-ROM, 3.4.
- 6) 服部昌太郎: 土木系大学講義シリーズ 13 海岸工学, pp.107-109, コロナ社, 1987
- 7) 清水勝義, 佐々木誠, 永井紀彦: 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 2006), 港湾空港技術研究所資料, No.1172, 94p, 2007
- 8) 鈴山勝之, 橋本典明, 永井紀彦, 吉田秀樹: 様々な地形条件下における波浪推算の精度向上のための幾つかの検討, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.171-175, 2005
- 9) 橋本典明, 萩本幸将, 松浦邦明, 松藤絵理子, 鈴山勝之: 内海・内湾域を対象とした波浪推算モデルの高精度化に向けた検討, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.126-130, 2007