

浅海波浪推算モデル SWAN の風洞水槽実験による比較検証

水谷 夏樹*・Sang Ho OH**・佐藤 裕司**
Kyung Doug SUH****・橋本 典明*****

風洞水槽を用いた詳細な実験を行うとともに、浅海波浪推算モデル SWAN による計算結果との比較検討を行った。推算結果は実験結果に対してスペクトル密度のピーク値でおよそ 1/2 程度、全体的に広帯域のスペクトル形状であった。また、スペクトル密度のピーク値及びピーク周波数については吹送距離に依存する量であると推察された。こうしたスペクトル形状についての比較に対し、有義波高及び有義波周期については極めて良好な一致を示し、これらの結果の推察から、SWAN が全エネルギーについては良好に輸送するものの、スペクトル形をシャープにするような非線形エネルギー輸送の取り扱いに不備があるという推察に至った。

1. はじめに

近年、第三世代の波浪推算モデルである WAM が注目され、日本周辺海域に対する様々な検証がなされるようになってきた(例えば、橋本ら, 1999; 畑田ら, 1999)。それに伴ってより内湾などの浅海域における波浪推算の必要性が高まってきており、外洋から沿岸域までを統一的に波浪を推算しようとする試みも行われている(宇都宮ら, 1999)。

前後してデルフト工科大学では浅海波浪推算モデル SWAN が開発されており、間瀬ら (2001) は SWAN を広島湾及び大阪湾に適用することによってその精度について検証を行っている。

一方、WAM や SWAN を研究対象としている研究者の統一した見解として、波浪推算の推算精度は推算に用いられる風の精度に強く依存し、推算結果の精度は入力風の精度を超えることはないとされている(橋本ら, 1999)。現在 WAM や SWAN は、ともに入力風として ECMWF の客観解析データを用いることが一般的であるが、ECMWF の海上風データは空間解像度及び時間分解能が不十分であり、それらを気象モデルを用いて時空間的に補間することで波浪推算結果が大きく向上することが報告されている(小林ら, 2000; 森ら, 2000)。

こうした背景を踏まえ、今後より一層高解像度のデータ供給の必要性が出てくるとともに、海底地形や周辺陸上地形の影響がより顕著となることは十分に予想される。一方、SWAN はそのマニュアルの中で解析対象を実験水槽から現地スケールまでとしており、スペクトルモ

デルでありながら空間的に急激に変化する場に適用可能なモデルとして興味深い。今後 SWAN をより高精度に改良するには、外力条件が制御可能な風洞水槽実験との比較検証が必要不可欠となる。そこで本研究では風洞水槽を用いた精密な実験を行い、それらとの比較を行うことで SWAN の特性に対する検討を行う。

2. 実験計測の概要

実験は図-1 に示すように、国土技術政策総合研究所が所有する風洞水槽(長さ 28.5 m × 幅 1.5 m × 高さ 1.3 m)を用いて行い、水深を 53 cm に設定した。風速は送風機の回転数を 100~400 Hz の間を 100 Hz ごとに 4 通り設定し、水槽内の 5 カ所(W01~W05)において平均風速の鉛直分布を計測するとともに、W01 を除く 4 カ所において水面変位の計測を行った。平均風速については熱変換タイプの風速計(カノマックス製: 応答周波数 0.1 Hz)を用い、サンプリング周波数 10 Hz で 60 秒(データ点数 600 点)の計測を行って平均を求めた。また、水面変位については抵抗線式波高計(ケネック製: 応答周波数 30 Hz)を用い、サンプリング周波数 200 Hz で 656 秒(データ点数 131,200 点)の計測を行った。表-1 に計測点位置と各計測点における平均風速の最大値を示す。

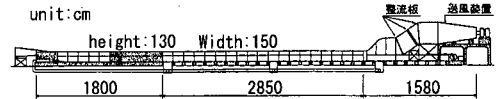


図-1 風洞水槽の概要

表-1 各計測点における平均風速の最大値 (unit: m/s)

	W01	W02	W03	W04	W05
fetch	1.04 m	5.47 m	11.35 m	17.35 m	23.23 m
100 Hz	3.21	3.24	3.45	3.67	3.81
200 Hz	6.15	6.42	6.74	6.94	7.49
300 Hz	9.16	9.88	10.16	10.07	10.83
400 Hz	12.17	12.72	13.45	13.27	14.09

* 正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸域システム研究室
** ソウル大学大学院地球環境システム工学部
*** 国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室
**** Ph.D. ソウル大学教授 大学院地球環境システム工学部
***** 正会員 工 博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理研究室長

3. 実験結果に対する考察

図-2はW01, W03, W05の各点における水面上の風の平均速度分布である。(a)はW01での鉛直分布であり、風洞水槽の物理的な構造上、流入端に最も近い計測点となっているので実質的に流入風速分布となる。各図の分布形は既往の研究結果と変わるものではなく、水面に最も近いところから対数則分布が適応できる。図中の実線は対数則分布を当てはめたときの最小二乗回帰直線である。摩擦速度はカルマン定数(ここでは $\kappa=0.4$)を回帰直線の傾きで除して求められることから、直線の傾きが摩擦速度を表していると言える。図から200, 300, 400 HzのケースでW03とW05での直線の傾きはほとんど変わることがないか、むしろ逆転しているような場合も見られる。一般に水面に近いところでは乱流境界層が流下方向に発達することから、摩擦速度は流下方向に

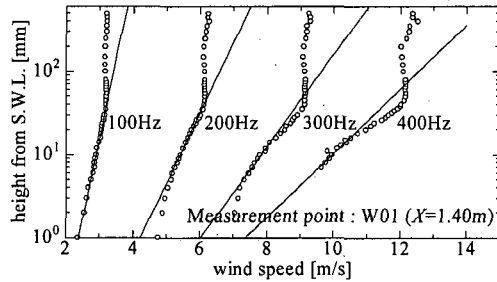
大きくなると考えられるが、ここではそうっていない。これらの要因に碎波の存在が影響することは十分に考えられるが、ここでは不明である。

平均速度の鉛直分布に対数則を仮定して摩擦速度や粗度高さを求める方法は、対数則を当てはめる計測データの選定に大きく依存する。本研究では、W01において明らかに対数則からずれていく水面極近傍(静水面から3 mm以内)を除いて、水面に近い領域から対数則分布が成り立つものと仮定している。そこから上層に向かって計測データを取捨選択したが、対数則の上端に近い曖昧な領域では、選択によって相関係数が最も高くなるように行った。しかし、計測データにもばらつきがあり、2ないしは3点の取捨によって摩擦速度が数十%も変わるケースもあり、計算された摩擦速度について検証を行う必要がある。

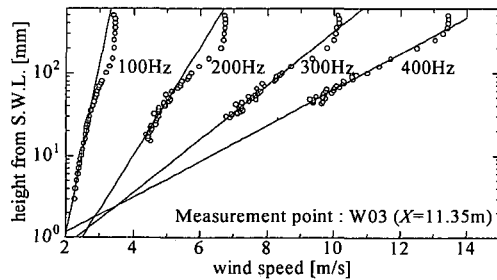
図-3は、摩擦速度と計測された平均風速の最大値との関係を示したものである。断面内の最大平均風速は側壁や上部の蓋の影響を強く受けると考えられるが、本研究で得られた実験結果は摩擦速度の値が全体的に若干小さく、また多少ばらつきがあるものの既往の実験結果とほぼ一致した結果を得ている。また、図-4は鳥羽の3/2乗則の適用を確認したものである。W01では水面変位の計測を行っていないことから、W01を除く12点の比較を行った。本研究で得られた実験データは極めて良い一致を示していることが確認できる。

以上のように本研究で得られた風速データは既往の研究結果と比べて良い一致を示しており、対数則による摩擦速度の計算においても以後の解析に用いることに問題がないと考えられる。

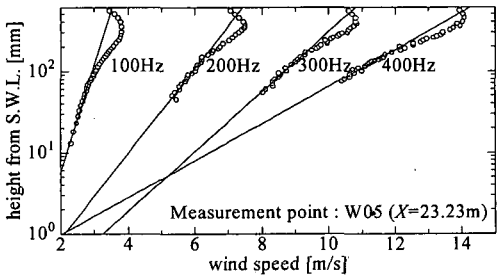
次に水面変位の計測について検討する。図-5は、W03及びW05における水面変位のパワースペクトルを示したものである。どちらの図も100 Hzのケースについては風波の発達が弱く、ピークの高周波数側の勾配も他のケースとは異なる。各ケースとも風速及び吹送距離の増



(a) W01



(b) W03



(c) W05

図-2 平均風速の鉛直分布

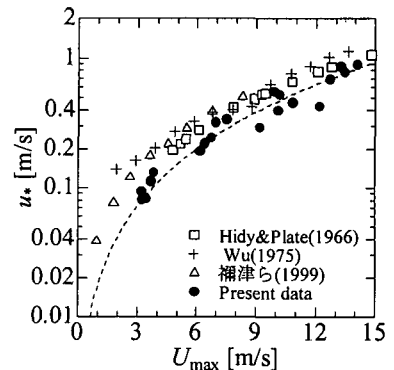


図-3 摩擦速度と最大平均風速の関係

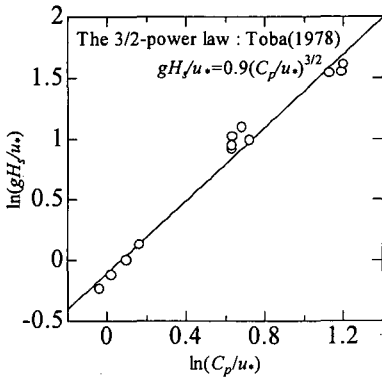


図-4 鳥羽の 3/2 乗則への適用

大に伴ってピークが低周波数側にシフトする様子が確認できる。また、300 や 400 Hz のケースでは 2 倍高調波が現れており、風速の増大に伴った波形の歪みが現れている。高周波数側のスペクトル勾配は W03, W05 とともに f^{-4} であり、十分発達した風波であることが分かる。

図-6 は風速ごとの有義波高と吹送距離の関係である。僅かではあるが 300 Hz のケースで W03 と W04 の間の傾きがその前後よりも大きく、これらの傾向は他の風速のケースでは見られない。実験を注意深く観察すると 300 Hz の風速のケースで、かつ W03 から W04 にか

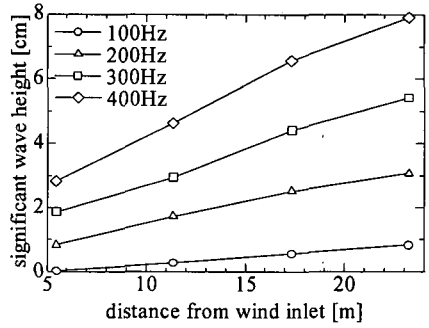


図-6 有義波高と吹送距離の関係

けて白波砕波が発生し始め、この領域は白波砕波の発生限界に相当するものと考えられる。Wu (1975) は吹送距離 9.8 m, 風速 9.5 m/s 以上の時に砕波が発生し、風と波の相互作用において支配するパラメータが表面張力から重力に変わると述べており、有義波高を始めとする波浪諸元及び摩擦速度に不連続な増加傾向が見られることを指摘している。本研究においてもこうした観察事実を踏まえれば、一時的な有義波高の増加傾向や図-2 で見られた摩擦速度の逆転現象に白波砕波が影響していることは十分に考えられる。

4. SWAN による再現計算

計算は 1 次元計算とし、空間格子を $dx = dy = 1$ m, 周波数の設定領域を 0.025~15 Hz として、この領域を 180 分割とした。また方向分割数を 72(5°) に設定した。

本研究では風速の変化のほか、初期条件として与える波浪のスペクトルや吹送距離に対する変化を調べるため、表-2 に示すような 3 通りの計算方法を用いた。すなわち入力条件として波浪のスペクトルを与えない場合と W02 でのスペクトルを与える場合、W03 でのスペクトルを与える場合の 3 通りとし、それぞれ下流側の計測点において計算結果を出力して比較を行った。

なお、それぞれの計測点において 10 m 高度の風速ではなく摩擦速度の実験値を直接入力し、計測点間については実験値を線形補間して与えた。

図-7 は 400 Hz の場合の SWAN による再現計算と実験結果との比較である。(a) は case 01 の場合で純粋に風のみで波浪を発達させた場合である。また、(b), (c) はそれぞれ W02 及び W03 を入力スペクトルとして波

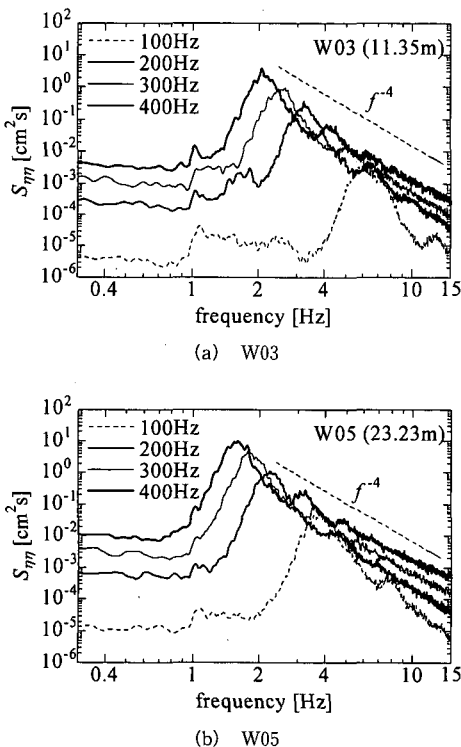


図-5 水面変位のパワースペクトル

表-2 SWAN の計算条件

	input spectrum	output spectrum
case 01	non	W02, W03, W04, W05
case 02	W02	W03, W04, W05
case 03	W03	W04, W05

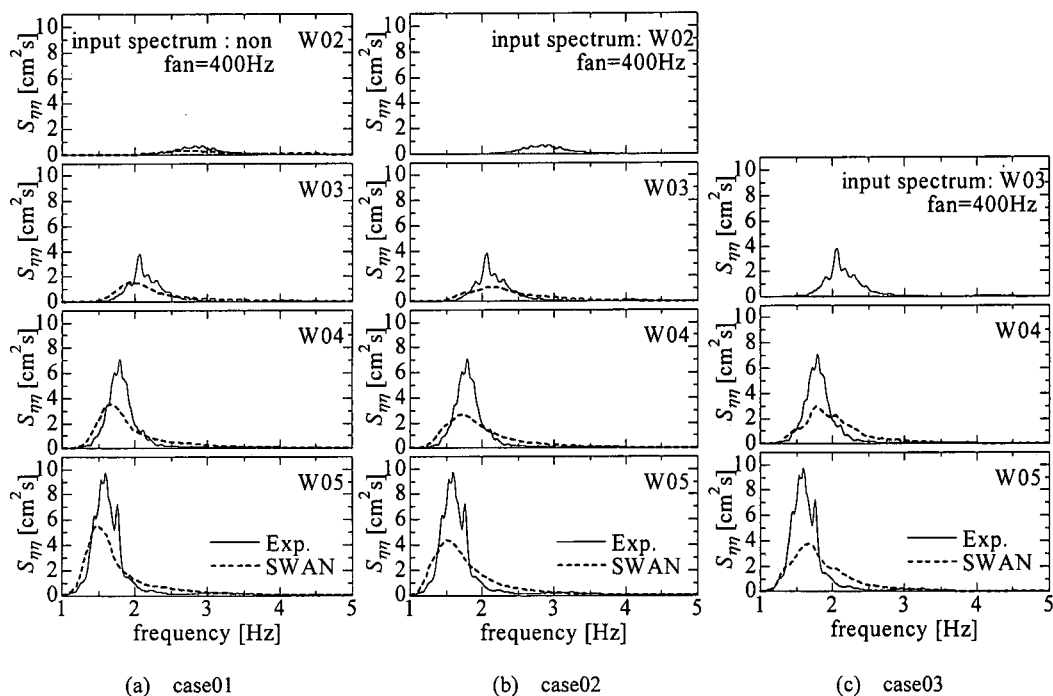


図-7 400 Hz の場合の SWAN による再現計算と実験結果の比較

浪を発達させた場合である。全てのケース及び比較地点において推算スペクトル密度のピーク値は実験値の 1/2 前後であり、実験値に比べて広帯域のスペクトルを示している。

W05 において 3 つのケースを比較すると case 01 が他に比べて若干ピーク密度が大きくなっており、case 02, case 03 になるほど小さくなっている。これらは主に吹送距離に依存する量であると考えられるが、case 03 は W03 において実験値のスペクトルが与えられている。これは case 01 の W03 における SWAN の途中経過よりもかなり大きい。にもかかわらず W05 においては case 01 の推算結果の方が大きいという結果になっている。また、推算スペクトルのピーク周波数を見ると case 01 が実験値より低周波数側にシフトしており、case 02 で実験値とほぼ同じ、case 03 では実験値より高周波数側に出現している。これらのピーク周波数の出現傾向もピーク値の出現傾向に類似しており、吹送距離に依存した量であると考えられる。

図-8 は W05 におけるスペクトルのピーク付近を拡大して比較したものである。縦軸を対数軸とするとスペクトル密度の差異は僅かに見えるが、実際には図-7 に示した通りである。実験値はピークの周辺がかなりシャープな形状を示しており、2 倍高調波が明瞭に現れている。また、5 Hz より高周波側では f^{-4} に従っている。一方 SWAN の推算結果は低周波数側のスペクトルの立

ち上がりは非常に良く再現されているものの、ピークから直接 f^{-5} 勾配となっており、2 倍高調波は表現されていない。

次に各計測点における有義波高、有義波周期の SWAN と実験の比較について表-3 に示す。実験値の有義波高、有義波周期は 656 秒間の計測からゼロアップクロスを用い個々波を抽出して算出したものである。一方 SWAN における有義波高は、スペクトルの全エネルギーから、有義波周期についてはピーク周波数の 105% の逆数をとって算出した。

結果は、全ケース、全計測地点において極めて良好な一致を示している。有義波高は僅か数 mm の誤差しかなく、有義波周期についても最大で 2/100 秒の差でしか

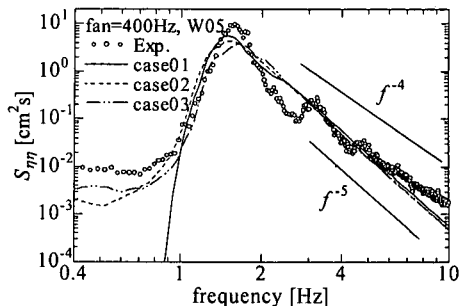


図-8 W05 における推算スペクトルのピーク周辺の比較 (fan=400 Hz)

表-3 SWAN と実験における有義波高, 有義波周期の比較

	$H_{1/3}$ (case 01)			$T_{1/3}$ (case 01)		
	SWAN	Exp.	error	SWAN	Exp.	error
W02	2.615 cm	2.830 cm	-7.591%	0.350 s	0.349 s	0.256%
W03	4.676 cm	4.630 cm	0.985%	0.481 s	0.470 s	2.405%
W04	6.348 cm	6.566 cm	-3.316%	0.575 s	0.557 s	3.157%
W05	7.507 cm	7.911 cm	-5.108%	0.640 s	0.624 s	2.567%
	$H_{1/3}$ (case 02)			$T_{1/3}$ (case 02)		
	SWAN	Exp.	error	SWAN	Exp.	error
W03	4.451 cm	4.630 cm	-3.866%	0.433 s	0.470 s	-7.951%
W04	6.145 cm	6.566 cm	-6.404%	0.555 s	0.557 s	-0.449%
W05	7.379 cm	7.911 cm	-6.729%	0.640 s	0.624 s	2.567%
	$H_{1/3}$ (case 03)			$T_{1/3}$ (case 03)		
	SWAN	Exp.	error	SWAN	Exp.	error
W04	6.135 cm	6.566 cm	-6.559%	0.536 s	0.557 s	-3.920%
W05	6.941 cm	7.911 cm	-12.259%	0.575 s	0.624 s	-7.805%

い。W05 について3つのケースを比較すると、図-7と同様に吹送距離が延びるにつれて誤差が小さくなる傾向にある。しかし、case 01 においては W02 や W03 でさえ極めて良い一致を示しており、風波の初期の発達状況にも SWAN が対応していることを示している。

図-7 において確認されたように、スペクトルの形状はかなり差があるものの、有義波レベルにおいては極めて良い一致を示した。これらの結果から、波浪の全エネルギーについては良好に輸送されていると考えられ、ただそれらを適切に分布させる非線形エネルギー輸送の取り扱いに問題があるものと推察される。WAM は P-M スペクトルのような広帯域スペクトルを取り扱う場合には比較的良好な結果を示すが、JONSWAP のような狭帯域スペクトルになるとシャープなスペクトル形を再現することができない。SWAN においても深海域での取り扱いは基本的に WAM と変わらないことから、実験値のような狭帯域スペクトルに対してスペクトル形状を表現することができなかったことも一因として考えられる。

5. ま と め

本研究は風洞水槽を用いて平均風速分布及び水面変動の詳細な実験を行うとともに、浅海波浪推算モデル SWAN を水槽スケールで計算して比較検討を行った。

実験結果については既往の研究結果と同様な結果が得られ、平均風速の鉛直分布から求められる摩擦速度の計算についても、既往の研究成果による精度の確認を行っ

た。

SWAN による推算結果については、実験結果と比較してスペクトル形状に著しい差異が生じ、スペクトル密度のピーク値でおよそ 1/2 程度、全体的に広帯域のスペクトル形状が得られた。また、吹送距離による推算結果の比較から、スペクトルのピーク密度や有義波高などの推算精度は、吹送距離に依存する量であると考えられ、SWAN の運用に注意が必要であることが示唆された。さらに、スペクトル形状の比較に対して有義波高及び有義波周期については極めて良好な一致を示したことから、SWAN がエネルギーの積分値である全エネルギーについては良好に輸送するものの、スペクトル形をシャープにするような非線形エネルギー輸送の取り扱いに不備があるという推察に至った。

謝辞：本研究は、文部科学省科学技術振興調整費若手任期付支援研究費による成果であることを付記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 宇都宮好博・大西健二・鈴木 靖 (1999): 第三世代波浪推算モデルの浅海域への適用, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 266-270.
- 小林智尚・飯野智彦・足立忠行・安田孝志 (2000): 海上風データの時空間分解能が波浪推算に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 256-260.
- 福津家久・中山忠暢・井上理恵 (1999): 風波発生下における水・空気海面での乱流構造に関する研究, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 413-418.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999): 方向スペクトル観測値に基づく第三世代波浪推算法 (WAM) の推算精度に関する検討, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 276-280.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学 (1999): 1 点浅海モデルおよび WAM による長周期波浪推算結果の相互比較, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 271-275.
- 間瀬 肇・平尾博樹・國富將嗣・高山知司 (2001): SWAN を用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検証, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 236-240.
- 森 信人・平口博丸・筒井純一 (2000): 気象モデルを用いた波浪推算の高精度化, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 261-265.
- Hidy, G. M. and E. J. Plate (1966): Wind action on water standing in a laboratory channel, J. F. M., Vol. 26, pp. 651-687.
- Toba, Y. (1978): Stochastic form of the growth of wind waves in a single-parameter representation with physical implications, J. Phys.Oceanogr., Vol. 8, No. 3, pp. 494-507.
- Wu, J. (1975): Wind-induced drift currents, J. F. M., Vol. 68, pp. 49-70.