

1. まえがき

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とともに、いくつかのモデル特性が明らかになってきた(例えば、橋本ら, 1999b; 畑田ら, 1999). それに伴って内湾など、より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统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。また 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も興味深い。

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, 1999b). 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、港湾施設整備に伴う極大波浪の局地統計予測や常時波浪の推算に波浪推算モデルを実用化しようと様々な検討が行われている。しかし、現状において島影や半島の背後など陸上地形の影響が及ぶ領域、台風などの常に風向が変化する領域などは推算精度が著しく低い。これらは風から波へのエネルギー入力項や砕波によるエネルギー散逸項に不備があると指摘されているものの改善の手だては未だ示されていない。港湾施設整備は、港湾施設そのものが複雑な地形を有する閉鎖性海域に存在することが多く、かつ極大波浪を生み出す台風のような条件下における波浪推算の重要性が最も高いことから、上記の問題点を早急に解決していかなければならない。

さらに情報通信技術の飛躍的な向上に伴って、気象庁の GPV データのオンライン配信など、ECMWF と比較してより空間解像度の高い気象データが入手可能になってきており、これまで ECMWF に合わせて調節されていた多くの調節パラメータを高解像度データに再調節する必要がある。

今後、予測情報を含めた詳細な波浪情報を提供するために

は、より一層の高解像度データの供給が必要となる。これに伴って海底地形や周辺陸上地形の影響がより顕著となることから、前述の問題を解決し波浪推算モデルをより高精度に改良していかなければならない。

そこで本研究では、まず波浪推算モデル SWAN の現状における基本的な推算特性を把握することを目的とし、外力条件が制御可能な風洞水槽実験との比較検討を行う。特に吹送距離と周波数スペクトルの発達過程との関係について詳細に検討し、その特性と問題点を明らかにする。

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(計測部の長さ28.5m×幅1.5m×高さ1.3m)を用いて行い、水深を53cmに設定した。風速は送風機の回転数を100~400Hzの間を100Hz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0.1Hz)を用い、サンプリング周波数10Hz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30Hz)を用い、サンプリング周波数200Hz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。



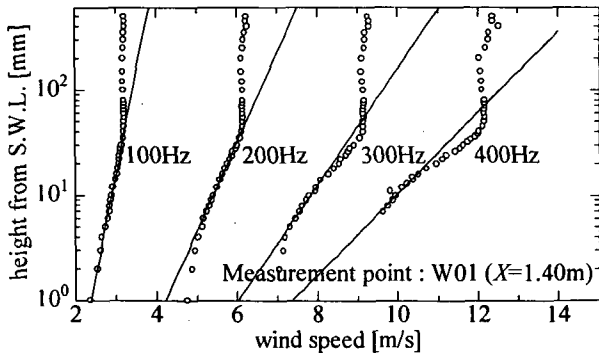
図-1 風洞水槽の概要

表-1 各計測点における平均風速の最大値 (unit: m/s)

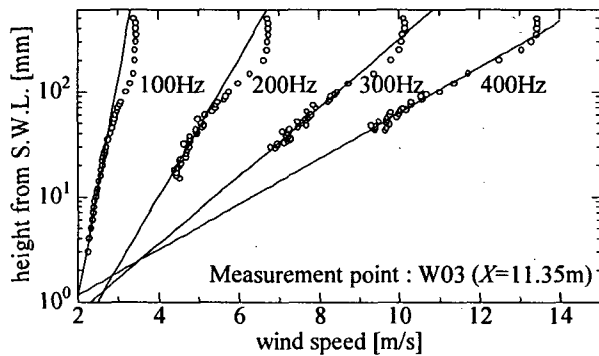
	W01	W02	W03	W04	W05
fetch	1.40m	5.47m	11.35m	17.34m	23.23m
100Hz	3.21	3.24	3.45	3.67	3.81
200Hz	6.15	6.42	6.74	6.94	7.49
300Hz	9.16	9.88	10.16	10.07	10.83
400Hz	12.17	12.72	13.45	13.27	14.09

3. 実験結果に対する考察

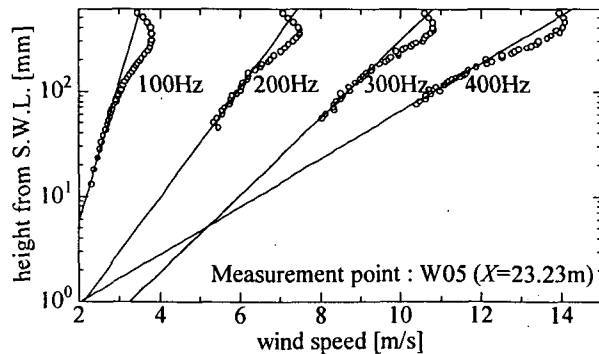
図-2は W01, W03, W05 の各点における水面上の風の平均速度分布である。(a)は W01 での鉛直分布であり、風



(a) W01



(b) W03



(c) W05

図-2 平均風速の鉛直分布

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(加藤ら, 1976; 加藤ら, 1981)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, 400Hz 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. これらの要因に砕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 3mm 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成果と比べて良い一致を示しており, 対数則による摩擦

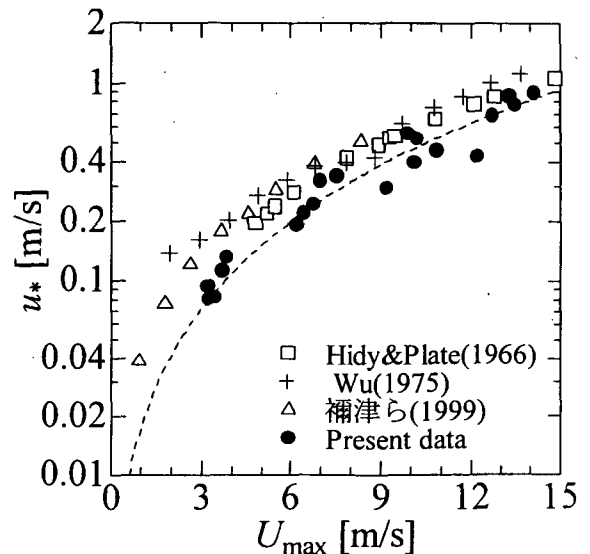


図-3 摩擦速度と最大平均風速の関係

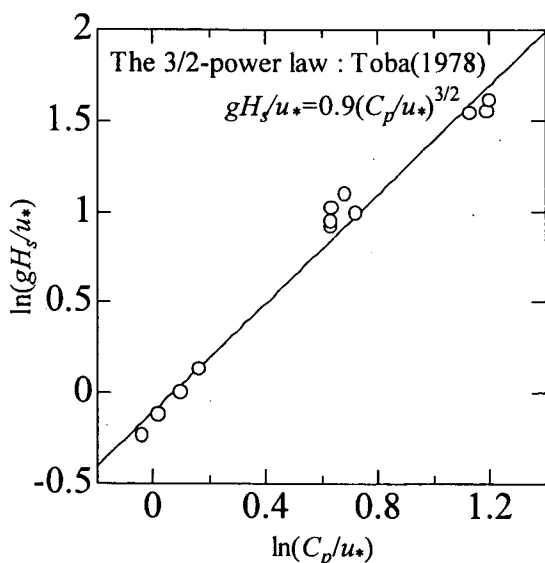
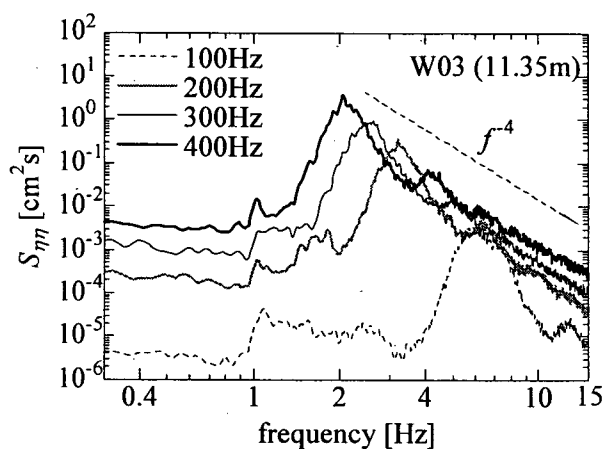
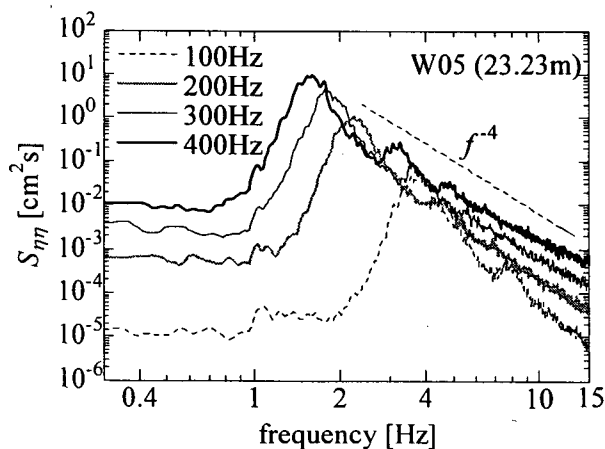


図-4 鳥羽の3/2乗則への適用



(a) W03



(b) W05

図-5 水面変位のパワースペクトル

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100Hz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400Hz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300HzのケースでW03とW04の間の傾きがその前後の区間よりも大きく、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300Hzの風速のケースで、かつW03からW04にか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9.8m、風速9.5m/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. SWANIによる再現計算

4.1 周波数スペクトルの比較

計算は1次元計算とし、空間格子を $dx=dy=1m$ 、周波数の設定領域を0.025~15Hzとして、この領域を180分割と

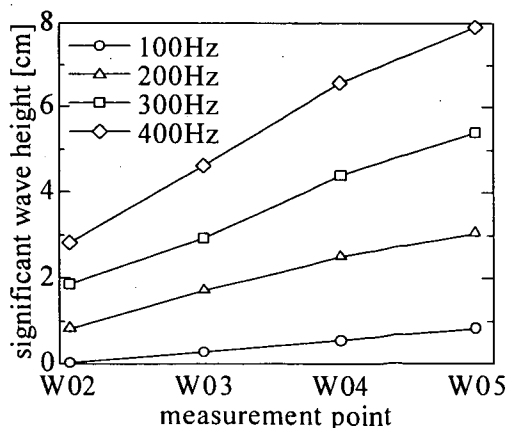


図-6 有義波高と吹送距離の関係

表-2 SWAN の計算条件

	input spectrum	output spectrum
case01	non	W02,W03,W04,W05
case02	W02	W03,W04,W05
case03	W03	W04,W05

した。また方向分割数を $72(5^\circ)$ 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 10m 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水表面に風応力を与えた。

図-7, 8, 9 は各風速における SWAN による推算結果と実験結果との周波数スペクトルの比較である。(a) は case01 の場合で純粋に風のみで静水面という初期条件から波浪を発達させた場合である。(b), (c) はそれぞれ W02 及び W03 を入力スペクトルとして波浪を発達させた場合である。各図の(a)においては、最上段の W02 でのスペクトル

のみ縦軸を拡大して表示してあるので注意されたい。計算では、W01 を風の流入端としていることから、W02 における吹送距離は僅か 4m 程度である。この吹送距離は、風波のごく初期の発達過程を捉えているものと判断できるため、SWAN における風から波へのエネルギーの入力項について議論することができる。

この点に着目して W02 における周波数スペクトルを見ると、各風速のケースに共通してスペクトルのピーク密度は実験値に対して低いものの、ピーク周波数に対しては概ね実験値を再現している。一般に波浪推算モデルにおける風から波へのエネルギーの入力項は、Phillips の理論と Miles の理論の線形和で表現されている。風波の初期の発達過程については実海域においてもさざ波程度であり、この点については水槽実験とのスケールの差異はない。よって本実験結果より、風から波へのエネルギー入力項については、理論に基づいた周波数帯に対して適切なエネルギーの入力がなされていると判断することができる。

次に図-7, 8, 9 の各風速の case01 における下流側への発達過程について検討する。いずれの風速の場合においてもその発達過程においてスペクトルのピーク密度は推算値が実験値を下回っており、推算値は実験値に対して広帯域に分布している。W05 におけるピーク密度は推算値が実験値に対して 200Hz の場合で約 1/4, 300Hz の場合で約 1/3, 最も発達する 400Hz の場合でも約 1/2 である。一方ピーク周波数についても同様に 400Hz のケースが最も

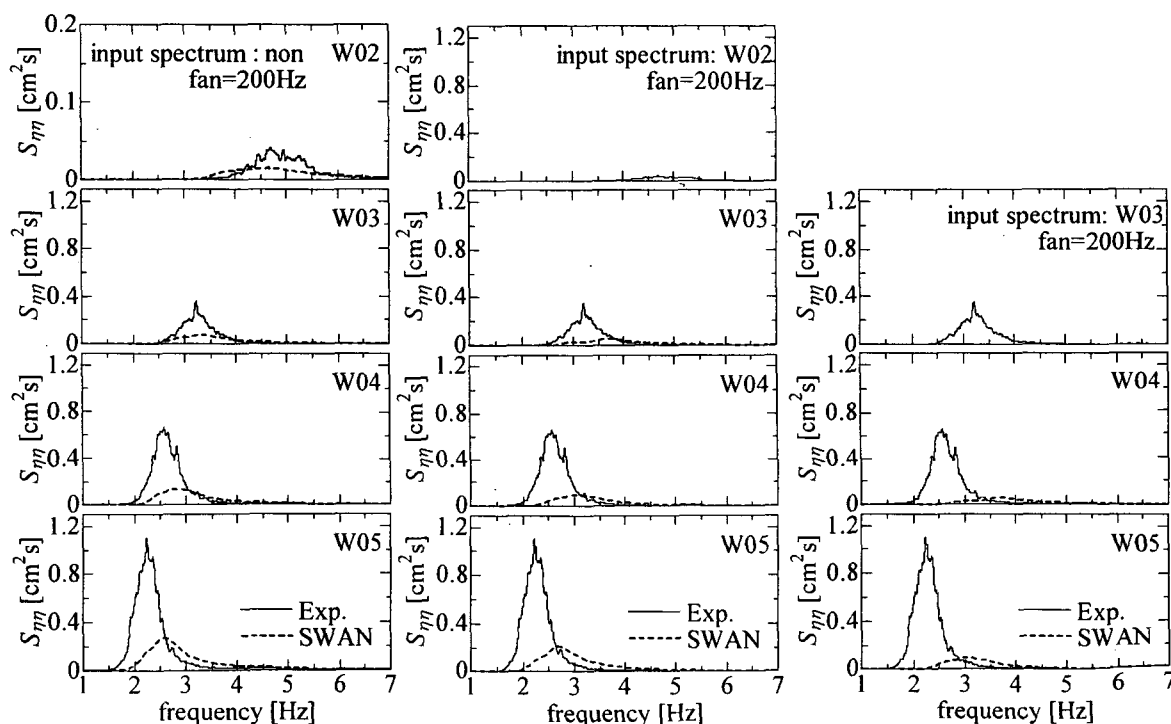


図-7 200Hz の場合の SWAN による再現計算と実験結果の比較

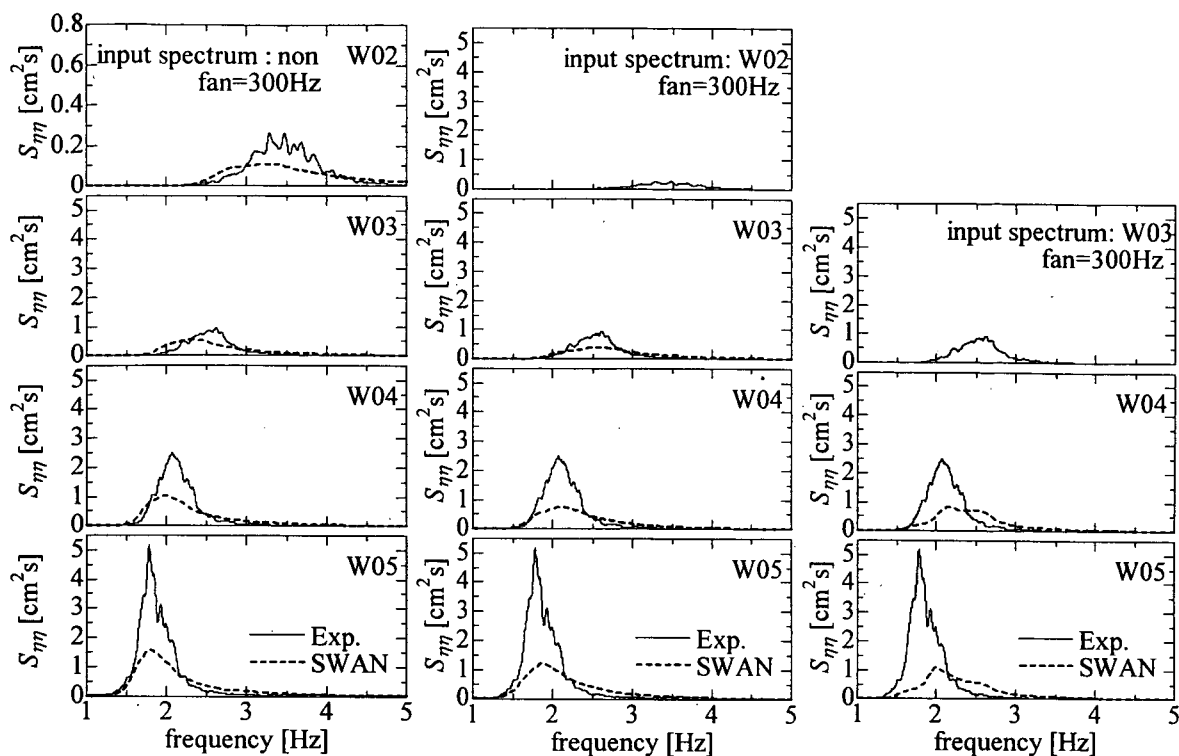


図-8 300Hz の場合の SWAN による再現計算と実験結果の比較

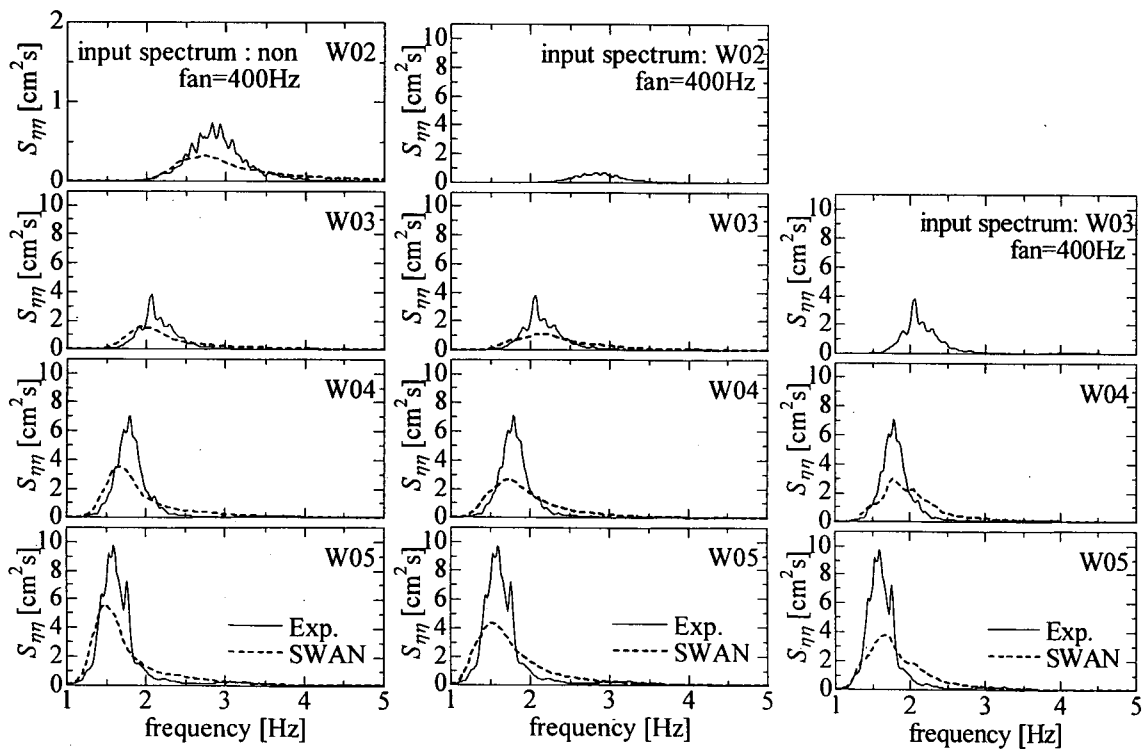


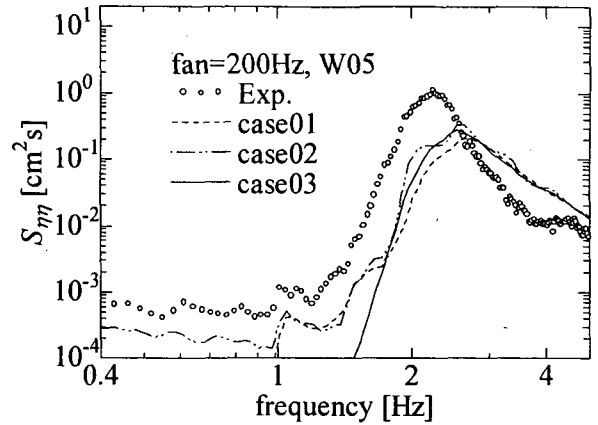
図-9 400Hz の場合の SWAN による再現計算と実験結果の比較

よく一致しており、300Hz や 200Hz のケースでは、ピーク周波数の低周波数側へのシフトが十分ではない。これらのピーク周波数の低周波シフトに対して碎波の影響が大きく作用していることは容易に考えられるが、現時点で碎波の作用だけを取り出して検討することはできない。一般に個々波の碎波は、その作用によってピーク付近のエネルギーを散逸させると共に、比較的ゆっくりとした流れに伴う低周波数側への擾乱を生成するほか、高周波数側に細かな乱れを伴う擾乱をも生成する。碎波によって、エネルギーの再分配機構が作用していると考えられるが、波浪推算モデルの中にはさらに f^{-5} 乗則に従ったりミッターが存在するため、碎波の作用だけを切り離して議論することは、現時点では難しい。

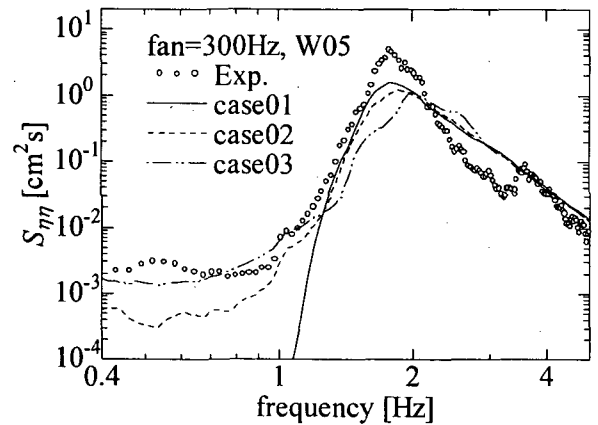
次に実験値のスペクトルを入力して発達させた case02 及び case03 について検討する。全ての風速のケースに対し W05 において3つのケースを比較すると case01 が他に比べて若干ピーク密度が大きくなっており、case02, case03 になるほど小さくなっている。これらはスペクトルのピーク密度が吹送距離に依存する量であるためと考えられる。例えば、case03 は W03 において実験値のスペクトルが与えられている。これは case01 の W03 における SWAN の途中経過よりもピーク密度がかなり大きい。にもかかわらず W05 においては case01 の推算結果の方が大きいという結果になっている。このように、いずれのケースも途中で実験値のスペクトルを与えているにもかかわらず、その形状を保持することができず、広帯域のスペクトル形状に戻ってしまっている。これらの傾向は case03 だけでなく、より上流側の値を与える case02 の場合でさえも同様に発生していることから、碎波の影響と考えることはできない。橋本ら(1999a)は WAM における非線形相互作用の取り扱いにおいて4波共鳴が発生する波の組み合わせを増やすことで、それまで表現できなかった JHONSWAP 型のシャープなスペクトル形状を表現することに成功している。この拡張 D.I.A.法はスペクトル形状をシャープにするだけでなく、ピークを低周波数側へシフトさせることも含まれている。SWAN においても深海域における非線形相互作用の取り扱いは WAM と同様であることから、実験値のスペクトルのようなシャープな形状を表現するには、モデルの中でのこれら非線形相互作用の取り扱いを改良する必要があると思われる。

次に発達したスペクトル形状に対する比較を検討するため、各風速における W05 におけるスペクトルのピーク付近を拡大したものを図-10 に示す。(c)の 400Hz の場合は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-9 に示した通りである。実験値はピ

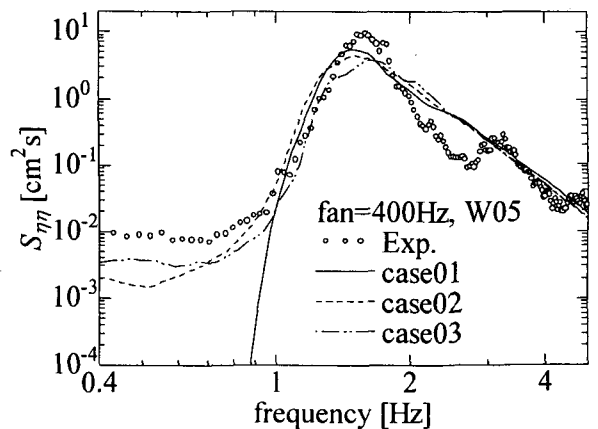
ークの周辺がかなりシャープな形状を示しており、2倍高調波が明瞭に現れている。また、5Hz より高周波側では f^{-4} に従っている。一方 SWAN の推算結果は低周波数側のス



(a) 200Hz



(b) 300Hz



(c) 400Hz

図-10 W05 におけるピーク付近の周波数スペクトルの比較

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^{-3} 勾配となっており、2倍高調は表現されていない。(a)及び(b)の各風速についても同様の傾向が見られるが、ピーク密度及びピーク周波数共に実験値との差異は400Hzに比べるとかなり大きい。

4.2 有義波高と有義波周期の比較

各風速におけるSWANによる推算値と実験値の有義波高の比較を図-11に、有義波周期の比較を図-12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。

有義波高の比較については400Hzの場合の一致度が突出して高く、風速が弱くなるにつれて実験値との差異が大きくなっている。それらの差異は周波数スペクトルで見られたピーク密度の変化に対応しており、エネルギーの積分値で表される有義波高においても発達が弱いと言える。しかしながら400Hzの場合は、最大でも数mmの差しかなく極めて良い一致を示している。400Hzのケースが他の風速のケースと大きく異なっている条件は、やはり砕波であり波浪の十分な発達と共に十分な砕波を伴っている場合は推算モデルがよく対応するものと考えられる。

一方、有義波周期について見ると200Hzのケースは若干差異が大きいものの、有義波高ほどの不一致は見られず、全体的に良い一致を示している。これらは波浪の発達に伴うピーク密度の発達は弱いものの、ピーク周波数の低周波数側へのシフトはある程度再現されていることを示している。ただし、砕波の影響の少ない200Hzについては差異が大きく今後さらに検討が必要である。

周波数スペクトルの検討において確認されたように、400Hzのケースでは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、十分発達した波浪状態の場合は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。前述したようにWAMはPierson-Moskowitz型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的な結果を示すが、JONSWAP型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、橋本ら(1999a)の拡張D.I.A.法を用いるなどの検討が必要であろう。また、風速の弱いケースについては有義波高の推算精度も不十分であり、これが砕波モデルの不備によるものなのか、それとも他に要因があるのかについて、さらに検討が必要である。

5. あとがき

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計測を行うとともに、浅海波浪推算モデルSWANの水槽スケールでの計算を実施し比較検討を行った。

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。

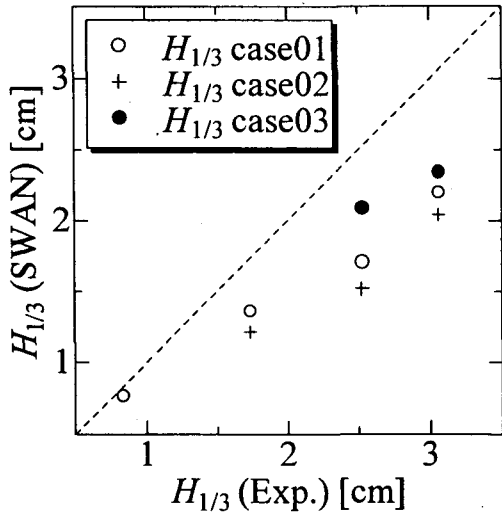
SWANによる推算結果については、実験結果と比較してスペクトル形状に著しい差異が生じ、スペクトル密度のピーク値でおよそ1/4~1/2程度、全体的に広帯域のスペクトル形状が得られた。また、吹送距離による推算結果の比較から、スペクトルのピーク密度や有義波高などの推算精度は、吹送距離に依存する量であると考えられ、SWANの運用に注意が必要であることが示唆された。さらに、400Hzのケースのような強風下の十分に波浪が発達した場合は、スペクトル形状の比較に対して有義波高及び有義波周期については極めて良好な一致を示したことから、SWANがエネルギーの積分値である全エネルギーについては良好に輸送するものの、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。一方、風速の弱いケースについては有義波高の推算精度さえも低く、この要因が砕波モデルの不備に帰着するのかについてさらに検討を要する。

今回の検討では、砕波の影響が大きいということは示唆されたものの、それらの定量的な作用量については算定することができなかった。今後は、砕波の影響について個別に検討する必要があることから、エネルギー平衡方程式における砕波による散逸項のみの出力値を検討するなど、実験における砕波の状況を踏まえてさらなる検討を行う予定である。

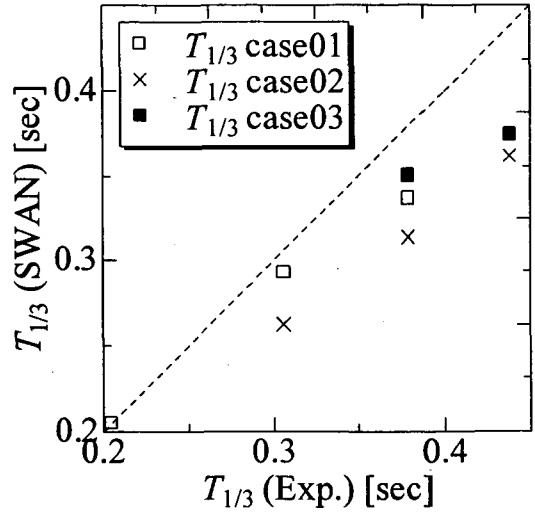
(2003年2月14日受付)

謝辞

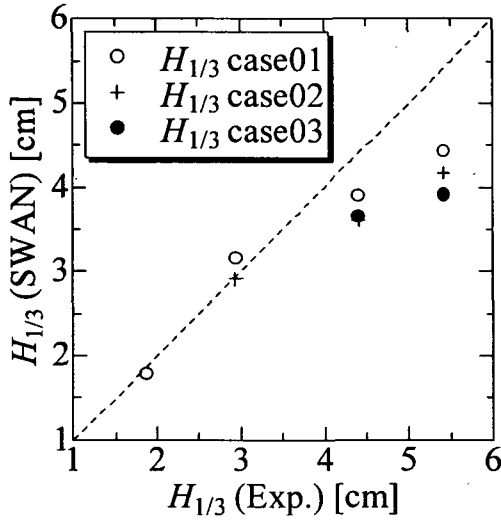
本研究を行うにあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部海洋水理研究室の橋本典明室長には有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。また本研究は、文部科学省科学技術振興調整費若手任期付支援研



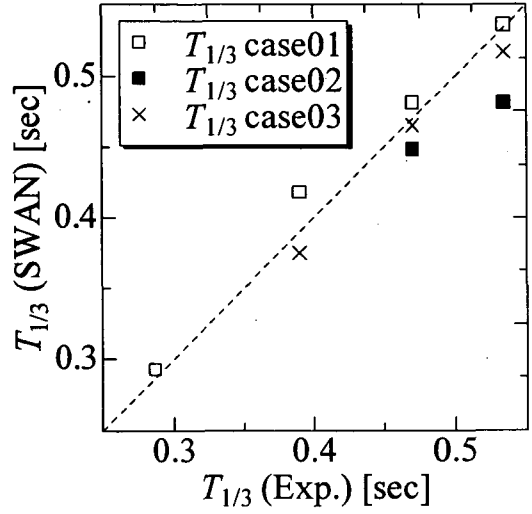
(a) 200Hz



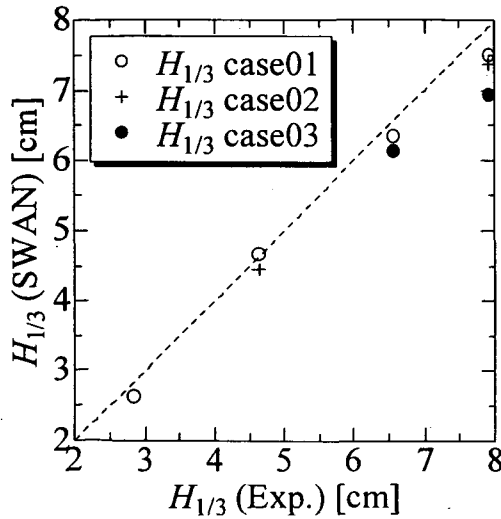
(a) 200Hz



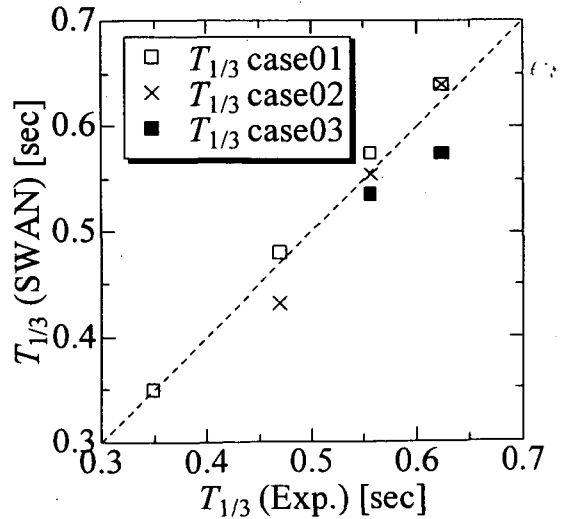
(b) 300Hz



(b) 300Hz



(c) 400Hz



(c) 400Hz

図-11 有義波高の比較

図-12 有義波周期の比較

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 卷, pp.266-270.
- 加藤 始・鶴谷広一・土肥俊満・宮崎 豊 (1976) : 流れの中の風波についての実験的研究 (第 2 報), 港湾技術研究所報告, 第 15 卷, 第 4 号, 48p.
- 加藤 始・鶴谷広一・寺川博也 (1981) : 流れの中の風波についての実験的研究 (第 3 報) - 波の推算方法とその検証実験 -, 港湾技術研究所報告, 第 20 卷, 第 3 号, pp.93-129.
- 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 卷, pp.256-260.
- 瀬津家久・中山忠暢・井上理恵 (1999) : 風波発生下における水・空気界面での乱流構造に関する研究, 水工学論文集, 第 43 卷, pp.413-418.
- 橋本典明・川口浩二・鈴木正芳(1999a) : 海洋波の非線形相互作用における離散相互作用近似の拡張, 海岸工学論文集, 第 46 卷, pp.231-235.
- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999b) : 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 卷, 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 卷, 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 卷, 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 卷, 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.