

大阪湾の風と風波の関係

後藤 智明*・末次 広児**・小舟 浩治***

1. はじめに

スペクトル法による波浪推算モデルは、波浪の発達・減衰に関してより詳細にモデル化できる可能性があること、またうねりの取り扱いが比較的容易であることなどから、数多くの研究がなされ種々のモデルが報告されている (SWAMP group, 1985)。しかしながら、推算モデルの基本となる波浪の発達・減衰に関する力学的機構は未だ十分に解明されておらず、これらの推算手法はすべて実測値に基づいた定式化がなされていることも事実である。また、現状の推算モデルの多くは、北大西洋の波浪観測結果に基づくものであり、台風や強い季節風を主要因とする我が国沿岸の波浪特性に合致するものであるかどうかかわからない。したがって、風と波の間の力学的機構を完全に理解することが難しい現段階においては、少なくとも我が国沿岸で観測された資料により推算モデルを検証すべきであり、また我が国特有の波浪特性を組み入れたものに修正していくことが必要であると思われる。

また最近、波浪の発達に関しても非線形性が重要であることが認識され、風波とうねりを分離しそれぞれパラメータおよびスペクトルで扱うハイブリッドパラメータ波浪推算モデルが各国で研究されるようになってきている (SWAMP group, 1985)。この背景のひとつに発達、非線形相互作用、砕波による減衰を個別に扱うスペクトル法による波浪推算モデルを検証するためにはより精密な波浪観測が必要不可欠であるという問題があるためと思われる。少なくとも風波に関しては現状のパラメータ法でもスペクトル法と同程度の精度を有すると考えられており、実務に利用される頻度も高い。したがって、モデルの構築・検証が比較的簡単なパラメータモデルを観測資料で高精度のものに順次改良していくことが工学的により重要であると思われる。

以上のような理由により本研究では、我が国の波浪特性に合致するハイブリッドパラメータ波浪推算モデルの

開発研究の第一段階として、大阪湾で観測された資料により風と風波の関係を調べている。さらに、得られた知見を用いてパラメータ波浪推算手法について検討している。

2. 風波の有義波高と周期

ここでは、1984年から1987年の4年間に大阪湾で観測された風と波のデータを用いて風波に関する推算式の検討を行う。無次元化のために用いる風速としては、10 m 高度の風速 U_{10} および摩擦速度 U_* の2種類があり、本論文では無次元化された波高・周期・エネルギー・フエッチを下記のように表す。

$$\left. \begin{aligned} H^+ &= gH_{1/3}/U_{10}^2, & T^+ &= gT_{1/3}/2\pi U_{10}, \\ E^+ &= g^2 E/U_{10}^4, & F^+ &= gF/U_{10}^3, \\ H^* &= gH_{1/3}/U_*^2, & T^* &= gT_{1/3}/U_*, \\ E^* &= g^2 E/U_*^4, & F^* &= gF/U_*^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ はそれぞれ有義波高および有義波周期、 E は $(=H_{1/3}/3.83)^2$ で定義されたエネルギー、 g は重力加速度である。また、摩擦速度の算定法としては Mitsuyasu ら (1985) が博多湾の観測結果から導いた

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \begin{cases} (0.581 + 0.062 U_{10}) \times 10^{-3} & U_{10} > 8 \text{ m/s} \\ (1.29 - 0.024 U_{10}) \times 10^{-3} & U_{10} < 8 \text{ m/s} \end{cases} \\ U_* &= \sqrt{C_D U_{10}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

を用いている。

(1) 無次元波高と無次元周期の関係

従来から無次元波高と無次元周期の間には $3/2$ 乗の関係があることが知られている。Wilson (1985) の推算式からは、フエッチにわずかに依存するが平均的に

$$H^+ = B_W T^{+3/2}, \quad B_W = 0.038 \quad \dots\dots\dots (3)$$

の関係が導かれている。また、Toba (1972) は全く別の観点から独立に

$$H^* = B_T T^{*3/2}, \quad B_T = 0.067 \quad \dots\dots\dots (4)$$

を提案している。無次元波高と無次元周期の関係は、式 (4) を書き換えると

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部 海洋エネルギー利用研究室長
 ** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室
 *** 正会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室長

$$(H_{1/3}/L_{1/3})^2 = 2\pi B T^2 (U_*/C_{1/3}) \dots\dots\dots (5)$$

となることから明らかなように、波形勾配と波齢の関係を表すものと解釈できる。ここに、 $L_{1/3}$ および $C_{1/3}$ は有義波周期に対応する波長および波速である。

図-1 に観測値から風波であるという条件でデータを抽出し、年別に無次元波高 H^* と無次元周期 T^* の関係を描いたものの一例を示す。ここに、風波の条件としては、①波高、周期とも発達段階にあること。②風向と波向が一致し、2時間以上風向・波向が変化しないこと。③風速が 2 m/s 以上であること。④周期が 4.5 s 以下であること（沖波と見なすことができること）を採用した。図から、大阪湾の風波についても無次元波高と周期の間に $3/2$ 乗の関係が精度よく成り立つことがよくわかる。ただし、その係数は4年間の平均で 0.067 となり鳥羽の

提案した値 0.062 より若干大きめのものとなる。図-2 は図-1 と同じ条件で抽出したデータを波形勾配と波齢に関してプロットしたものである。

最近、この無次元波高と無次元周期の関係をを用いて海上風を波浪データから推算する方法が研究されている (Toba, 1972). すなわち、式 (4) を

$$U_* = \frac{H_{1/3}^2}{g B^2 T_{1/3}^3} \dots\dots\dots (6)$$

と書き換え、摩擦速度を逆算するのである。図-3 (a)、(b) は 1984 年の 1 月と 7 月について波浪データから推算した風速と実測風速を比較したものである。図から 1 月に関しては逆算風速と実測風速が非常によい一致を示すことがわかる。これは、大阪湾の冬季は、西系の風が支配的であり外洋からのうねりの侵入が少なく、風波とい

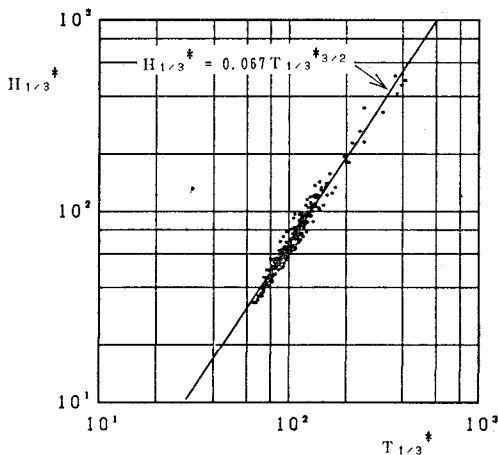


図-1 無次元波高と無次元周期

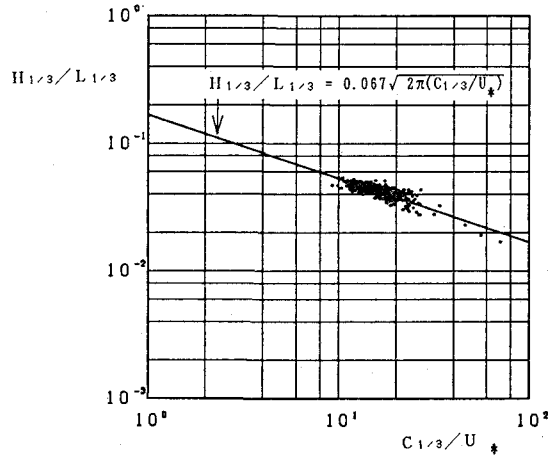
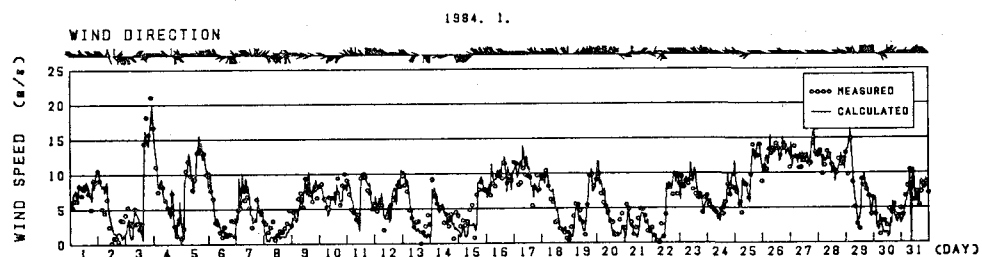
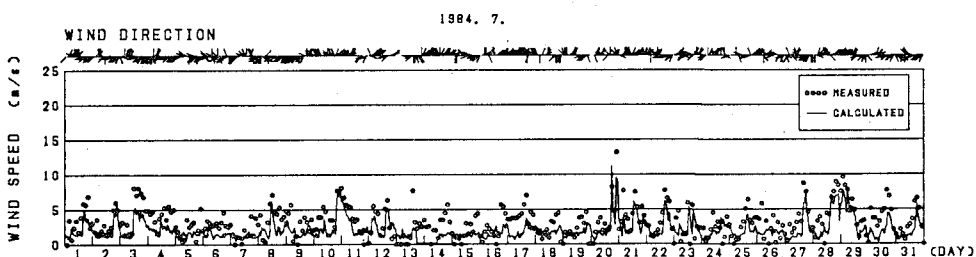


図-2 波形勾配と波齢



(a) 1984年1月



(b) 1984年7月

図-3 波浪データによる海上風の推算例

う条件が満たされるためと考えられる。一方、夏季の場合は大阪湾にうねりが来襲することと海陸風が顕著になるため波浪データから海上風の逆算精度が悪くなる。以上のことから、風波であるならば波浪データから海上風を推算する手法として無次元波高と無次元周期の関係を利用できる可能性があり、波浪推算で最も重要な問題として残されている気象データからの求めた推算風を補正する手法として利用したり、この $3/2$ 乗則を組み込んだ波浪推算モデルを開発することにより点で観測した波浪を面的に精度よく補間する手法が確立できる可能性もある。

(2) 無次元フェッチと無次元波高・周期・エネルギーの関係

風波の有義波諸元の発達特性を記述する経験式を通常推算式と呼んでいる。特に、時間的に定常に達し、風下方向に発達している fetch-limited の風波の推算式は、Severdrup-Munk の以後数多くの研究が行われ、改良が加えられている。現在最もよく利用されるのは Wilson (1965) が提案した Wilson IV 式と言われるものである。

大阪湾で観測されたデータは風向・風速の変動が大きく fetch-limited の状態に達しているか否かを容易に判定することが難しいため、風波であるという条件を課して波の伝播方向の無次元フェッチと無次元波高・周期の関係をプロットすることにした。風波の条件としては、図-1 を描くのに課したものでより厳しい条件、すなわち ①波高、周期とも発達段階にあり、式(4) (ただし、 $B=0.067$)から誤差 5% 以内のもの。②風向と波向が一致し、4 時間以上風向・波向が変化しないこと。③風速が 2 m/s 以上であること。④周期が 4.5 s 以下であること (沖波と見なすことができること)。とした。図-4 は無次元フェッチと無次元波高・周期の関係を描いたものである。図には比較のため Wilson の推算式が実線で描かれている。抽出条件から判断できるようにプロットされたデータは完全に fetch-limited に達した風波に関するものばかりでないため、データの法絡線が fetch-limited に達した状態に対応するものと考えられる。図から、Wilson 式は無次元周期が過小評価気味であるものの無次元波高については比較的よい精度があることがわかる。なお、プロットしたデータのうち無次元フェッチが大きいものは Wilson 式からはずれる傾向があるが、これらのデータはすべて風速が小さいものであるためデータの信頼性に欠けると考えてもよい。

図-5 は同様な条件で、摩擦速度で無次元化されたフェッチとエネルギーの関係をプロットしたものである。図中の線は後述する波浪推算を用いて実測波浪と推算波浪が合致するように試行錯誤で求めた推算式である。無次元フェッチが 10^7 程度で折れ曲がっているのは波浪推算する上での平衡状態を仮定していることになる。

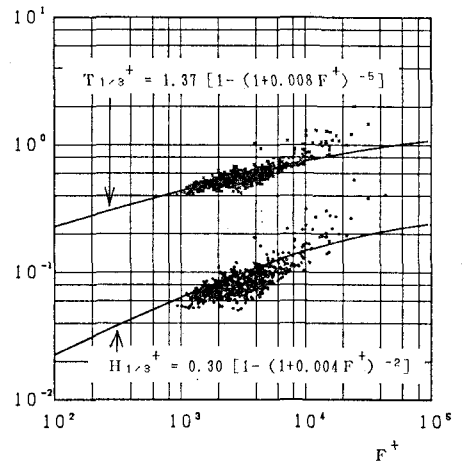


図-4 無次元フェッチと無次元波高・周期

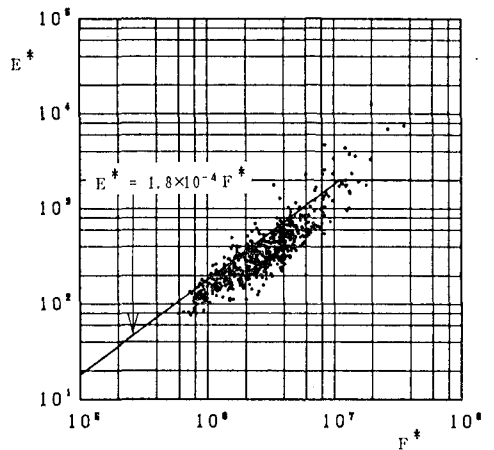


図-5 無次元フェッチと無次元エネルギー (摩擦風速による無次元化)

以上のことから、大阪湾の風波の無次元フェッチと無次元・波高・周期エネルギーの関係は、従来の経験則でよく説明できることがわかる。したがって、パラメータ型の波浪推算には従来の経験則をそのまま用いてもかまわない。ただし、無次元フェッチとの関係が線形で表される無次元エネルギーの関係をを用いた方がより簡単と思われる。

3. 波浪スペクトル

ここでは、1980 年から 1982 年の 3 年間に観測された波浪データからスペクトルを計算し、そのパラメータ等を検討した結果を報告する。波浪スペクトルに関しても 2. (1) に示した風波であるという条件を課している。

(1) 周波数スペクトルの積分値と有義波諸元

周波数スペクトルの積分値と有義波諸元の関係は種々の機会に取り扱われており、Mitsuyasu ら (1968) は、

$$H_{1/3} = 3.83 \sqrt{m_0}, \quad T_{1/3} = 1.21 \sqrt{m_0/m_2} \quad \cdots (7)$$

などを提案している。紙面の関係で相関図を割愛するが大阪湾のデータでも、Mitsuyasu らの結果とよい一致を示し

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3} &= 3.83\sqrt{m_0}, & T_{1/3} &= 1.20\sqrt{m_0/m_2} \\ T_{1/3} &= 1.10(m_0/m_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となる。なお、平均周期 $\bar{T}$ と有義波周期の間には

$$\bar{T} = 0.86T_{1/3} \dots\dots\dots (9)$$

の関係がある。

(2) 周波数スペクトル形

単純な水域に一定の風が吹き続いた場合に発生する風波のスペクトルが、安定した相似形を保つことは多くの研究者により報告されている。大阪湾の風波スペクトルを規格化し、相似則について検討した一例が図-6 である。図中の実線は、peak enhancement factor を $\gamma=2.5$, $\sigma_1=0.12$, $\sigma_2=0.15$ とした JONSWAP スペクトル (Hasselmann ら, 1973) である。データが多少バラつくものの JONSWAP スペクトルに極めてよい一致を示すことがわかる。

図-7 は JONSWAP スペクトルで大阪湾の風波スペクトルを近似した場合のスペクトルパラメータに関して整理したものである。パラメータ α と無次元ピーク周波数は無次元エネルギーと良好な相関が見られるが、peak enhancement factor はデータのバラツキが大きく相関式にまとめることが難しく、図には peak enhancement factor のうち γ についてのみ示している。peak enhancement factor の平均値は図-6 に示した $\gamma=2.5$, $\sigma_1=0.12$, $\sigma_2=0.15$ となり JONSWAP で求められたものと多少異なる。

4. 波向線型パラメータ波浪推算モデル

(1) モデルの定式化

上述の風波の推算式に関する検討結果をふまえ、新たに波向線型パラメータ波浪推算モデルについて検討した。波向線型波浪推算モデルの概要については推算式が異なるものの山口ら (1988) および著者ら (後藤・小舟, 1988) によりすでに報告されているため、ここでは使用した推算式の説明にとどめる。

モデルの推算式としては 3. で得られた 2 種類の経験則を用いている。ひとつは、無次元波高と無次元周期の間の 3/2 乗則

$$H^* = BT^{*3/2}, \quad B=0.067 \dots\dots\dots (10)$$

であり、他のひとつは無次元フェッチと無次元エネルギーの関係

$$E^* = \begin{cases} AF^*, & A=1.8 \times 10^{-4} \quad (F^* < 1.2 \times 10^7) \\ 2000 & (F^* \geq 1.2 \times 10^7) \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

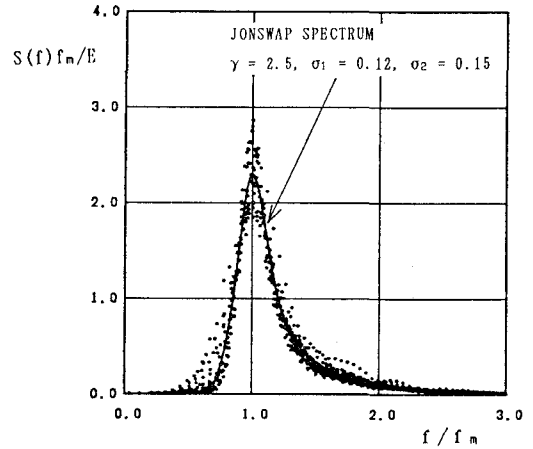


図-6 周波数スペクトルの相似則

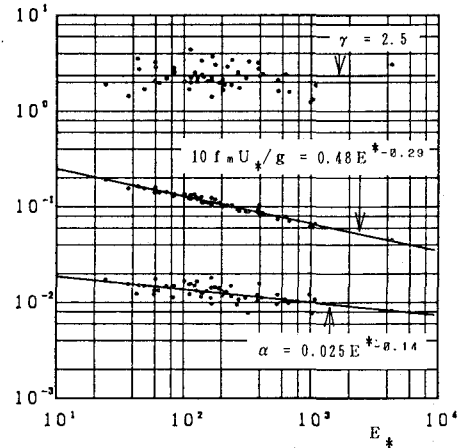


図-7 無次元エネルギーとスペクトルパラメータ

である。両式を仮定すると一次元の波浪の発達が

$$\frac{dE^*}{dt^*} = \frac{dF^*}{dt^*} \frac{dE^*}{dF^*} = AC_p^* \dots\dots\dots (12)$$

と記述できることから、波向線法のパラメータ波浪推算モデルは

$$\frac{dE(\theta)}{dt} = E_{NET} \dots\dots\dots (13)$$

と記述することができる。ここに、

$$E_{NET} = \begin{cases} (A/4\pi)(16/B)^{1/3}(U_*^3/g) \cdot E^{*1/3} \cdot \lambda(\theta) & (E^* < 2000) \\ 0 & (E^* \geq 2000) \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

であり、 $\lambda(\theta)$ は方向分布関数を意味し、

$$\lambda(\theta) = (3\pi/8) \cos^4 \theta \dots\dots\dots (15)$$

である。

(2) 試算結果

大阪湾は 30 km から 40 km 程度の海域であるため、波浪観測地点で観測された実測値を大阪湾全域にそのの

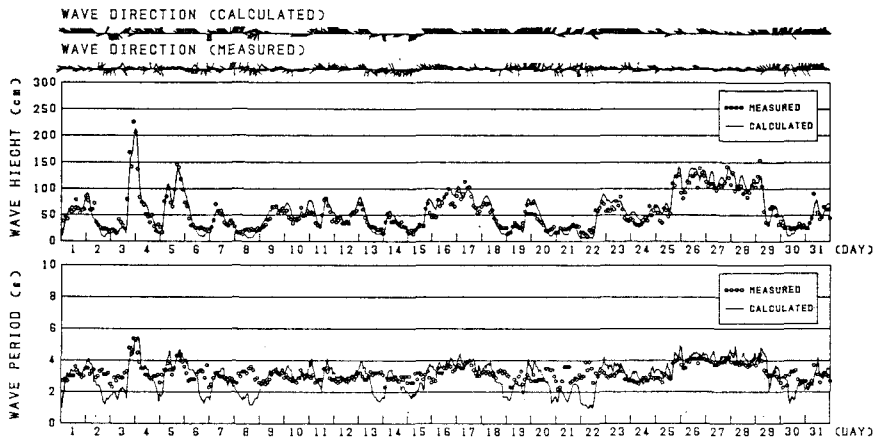


図-8 実測波浪と波浪推算結果の比較

の適用しても大きな誤りがないと考えられる。そこで、風の条件としては観測風の経時変化をそのまま大阪湾全域に与え、推算の格子間隔を $\Delta x = 1 \text{ km}$, $\Delta t = 120 \text{ s}$, $\Delta \theta = \pi/8$ とした。

図-8 は 1984 年 1 月 1 日から 31 日の 31 日間に関して試算した結果である。この試算結果は風波のみを対象としているため風が弱くなりうねり性の波浪と考えられる低波高の部分は波高・周期ともに推算値が実測値に比べ小さくなるが、風波と考えられる期間に関しては実測値と推算値が非常によく一致を示すことがわかる。したがって、うねりの取り扱いなど今後検討を要することが残されているが本研究で提示した比較的単純な方法でも良好な波浪推算ができることがわかる。

5. おわりに

本研究では大阪湾の気象および海象データを用いて風波の経験則とパラメータ波浪推算モデルについて検討を行った。得られた主要な結論は以下の通りである。

① 風波の局所平衡下の無次元波高と無次元周期の関係(鳥羽の $3/2$ 乗則)は大阪湾に関しても精度よく成り立つ。ただし、係数は鳥羽の提案したものより若干大きめである。また、推算風の補正手法として鳥羽の $3/2$ 乗則を利用できる可能性がある。

② 無次元フェッチと無次元波高・周期の関係は Wilson の提案したものに近い。ただし、周期は多少大きめである。無次元フェッチと無次元エネルギーの関係は摩擦速度で無次元化した方が線形の式に近い。

③ 以上の検討結果によりパラメータ波浪推算モデルを

検討し、実測風速を用いて推算した結果、推算波浪が実測波浪と非常によく一致を示すことがわかった。今後、うねりの取り扱いを含め我が国沿岸波浪観測データを用いてより精度の高いものを開発していく必要がある。

謝辞：本論文で用いた観測データは運輸省第三港湾建設局および関西国際空港株式会社の好意によるものである。関係各位に謝意を表すとともに、今後さらに御協力をお願いする。

参考文献

- 後藤智明・小舟浩治 (1988)：現地で観測にできる波浪推算法について，第 35 回海岸工学講演会論文集，pp. 222~226.
- 山口正隆・畑田佳男・日野幹雄・早川 淳 (1988)：波の方向性を考慮した新しいパラメータ波浪推算モデルの適用性，第 35 回海岸工学講演会論文集，pp. 227~231.
- Hasselmann, K. et al. (1973)：Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsches Hydr. Zeit., Reihe A, No. 12.
- Mitsuyasu, H. (1968)：On the growth of the spectrum of wind generated waves (1), Rep. Res. Inst. Mech., Kyushu Univ., Vol. 16, pp. 459~482.
- Mitsuyasu, H. and T. Kusaba (1985)：Drag Coefficient over water surface under the action of strong wind, Natural Disaster Science, Vol. 6, pp. 43~50.
- SWAMP group (1985)：Ocean wave Modeling, Plenum Press, 256 p.
- Toba, Y. (1972)：Local balance in the air-sea boundary process, 1. On the growth process of wind waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 28, pp. 103~120.
- Wilson, B. W. (1965)：Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959, Deut. Hydr. Zeit., No. 18, pp. 114~130.