

東京港の波浪特性と閉鎖海域の波浪推算手法

後藤 智明*・小 舟 浩 治**・菊 地 政 信***

早 川 完 治****・手 島 道 人****

1. はじめに

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、成分波スペクトル推算モデルにかわるハイブリッド・パラメータ推算モデルが各国で研究されている。後藤ら(1989, 1990)はこのような見地から、我が国の波浪特性に合致するハイブリッド・パラメータモデルの開発のため大阪湾の風と風波の関係を調べている。

本研究では、東京湾の風と風波に関して同種の検討を行い、閉鎖海域に適する波浪推算手法について検討した結果を報告する。

2. 東京港の風と風波の関係

東京港では、港湾開発、施工管理のための情報収集を目的として、昭和44年から写真-1に示す東京灯標において気象・海象観測を定期的に実施している。東京灯標は、羽田の東方約6kmの沖合に位置し、水深が16mの地点にある。図-1に示すように東京灯標に関するフェッチは西から北方向で短く、南から東にかけて長い、また、最長距離はSSW方向の34kmである。

東京灯標における観測は、超音波式波高計とプロベラ式風向風速計により2時間毎に10分間の記録が収録され、有義波諸元・風向・平均風速・最大風速などの演算処理がなされ、台帳形式に整理されている。なお、本研究で対象としたのは、昭和68年から昭和63年までの6年間に測得された波浪と風のデータである。

(1) 気象・海象の出現特性

昭和68年から昭和63年までの出現波浪の99%は、有義波高1.00m以下、有義波周期4.0s以下である。また、最多出現波浪は有義波高0.26m、周期3.0s以下である。一方、風については、冬期は北北東からの強い季節風が多く、夏季は南南西の強風が卓越する。東京港に高波をもたらす擾乱の多くは、フェッチの長い南系統

の強風によるものである。なお、東京湾を通過した台風8606においては、38m/sの風速が観測され、有義波高3.90m、周期4.2sが記録されている。

(2) 観測風の補正

東京灯標における風向・風速のデータは、写真-1のように、風向風速計がドーム状の屋根の上に設置され、しかも、北北東方向に燈台があるため、海上風を表しているとは考えにくい。また、風向風速計の設置高度はA.P+23mであるが、従来の風と風波の関係に関する



写真-1 東京灯標全影

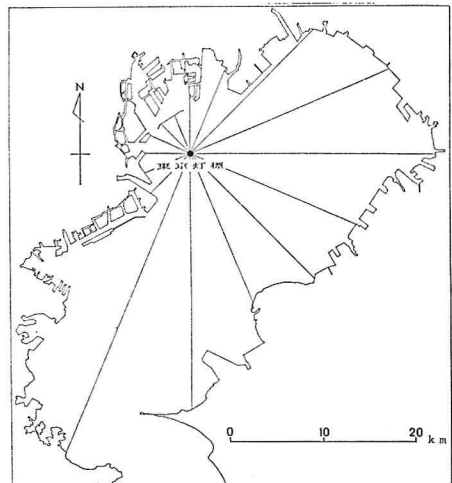


図-1 フェッチ図

* 正員 工博 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

** 正員 工博 同海洋水理学部海象調査研究室長

*** 東京都港湾局建設部技術管理課長

**** 同上技術管理課

経験則の多くが、海上 10 m 高度の風速値を用いているため、東京灯標の観測値も 10 m 高度の海上風に修正し、波浪の発達に関する検討を行った方がよいと判断される。以上の理由により、ここでは観測風の補正について検討する。

観測風の補正に用いた方法は、東京港の正確な 10 m 高度の海上風データがないため、Wilson IV 式を用いて海上風の推定値を算出し、観測風との相関式から補正係数を算定するものである。

Wilson 式から無次元フェッチを消去すると近似的に無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則の関係式

$$\left(\frac{gH_{1/3}}{U_{10}}\right) = B_W \left(\frac{gT_{1/3}}{U_{10}}\right)^{3/2}, \quad B_W = 0.013 \dots (1)$$

と表すことができる。したがって、観測風速と波浪諸元を式 (1) と同様な

$$\left(\frac{gH_{1/3}}{U_{23}}\right) = B \left(\frac{gT_{1/3}}{U_{23}}\right)^{3/2} \dots (2)$$

にあてはめ、係数 B を求めることにより、観測風の補正係数すなわち観測風 U_{23} と 10 m 高度風速 U_{10} の比率 μ を

$$\mu = \frac{U_{10}}{U_{23}} = \left(\frac{B_W}{B}\right)^2 \dots (3)$$

として算定することができる。

図-2 は東京灯標の観測波浪諸元と観測風を用いて、補正係数 μ を風向別に示したものである。補正係数は 0.6 から 0.8 の範囲に分布している。しかし、23 m と 10 m の高度差に風速の比は、対数則あるいは $1/7$ 乗則で見積っても 0.9 程度であることから、東京灯標の観測風速は、全方位にわたり構造物の影響をかなり受けているものと考えられる。また、風向別に μ の値が大き

く違うのは、それぞれの方位のフェッチ、また、対岸にある構造物の違いから、風速の鉛直分布に差のあることに起因すると考えられる。

次に、図-3 は、式 (1) に波浪諸元を与えることに

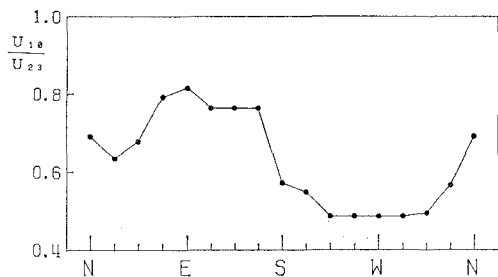


図-2 方位別風速比

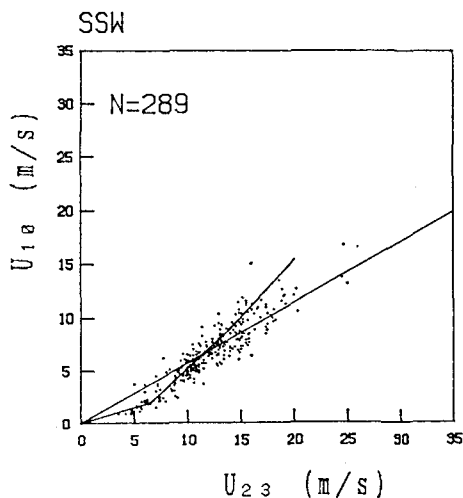


図-3 観測風と海上風

1985 - 2

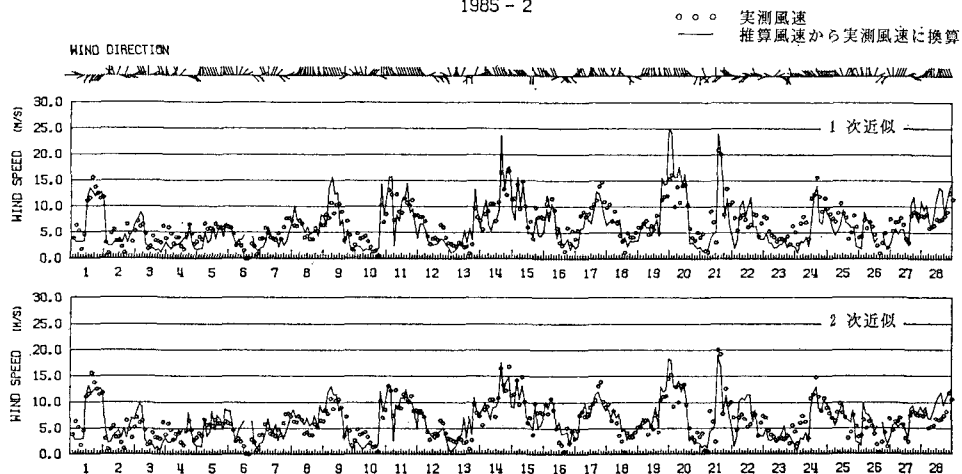


図-4 観測風と観測波浪から推算された風の比較

より逆に推算した海上 10 m 高度の風速と観測風速の関係をプロットした一例である。図中の直実線は風向別の補正線である。データは平均的にこの実線のまわりにプロットされているが、風速の階級により分布状況が変動している。そこで、さらに精度を上げるためには、風速階級別に補正係数を変える必要がある。風速階級別の補正を 1 次式で評価すると図中の折れ線のようになる。したがって、東京灯標の観測風速の補正は風向別の補正と風速階級別の補正の二段階補正法を採用したことになる。

補正手法の検証の一例として、波浪諸元から式 (2), (3) を用いて U_{23} を推算し観測風速と比較したものを図-4 に示す。上図が一次補正結果、下図が二次補正結果との比較である。一次補正でも比較的良好な精度で観測風速を再現しているが、ピーク付近で差が大きい。しかし、二次補正では、低風速の部分で多少合わないものの、ピーク付近でかなりの精度を有していることがわかる。

(3) 風波の有義波高と周期

局所平衡化の風波には、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。例えば、 U_{10} により無次元化された波高、周期は前述した式 (2) の関係にある。また、無次元化に摩擦速度 U_* を用いた場合にも、Toba (1985) により $3/2$ 乗則が成り立つことが報告されており、後藤ら (1989) も Mitsuyasu の C_D 則を用いて大阪湾の観測データから

$$\left(\frac{gH_{1/3}}{U_*}\right) = B_T \left(\frac{gT_{1/3}}{U_*}\right)^{3/2}, \quad B_T = 0.067 \quad \cdots (4)$$

を導いている。

図-5 は観測データから 2.(2) と同様な風波の条件を課して Mitsuyasu の C_D 則による無次元波高と無次元周期の関係を描いたものである。図からは東京港の風波に関しても無次元波高と無次元周期の間に、 $3/2$ 乗の関係が精度よく成り立つことがわかる。そして、その係数は著者らが大阪湾の風波の検討で得た 0.067 をよく支持している。

(4) 無次元フェッチと無次元エネルギーの関係

図-6 は無次元フェッチと無次元エネルギーの関係を示したものである。データ抽出の風波の条件は、前節で課したものより厳しく、すなわち①波高、周期とも発達段階にあるもの。②4 時間以上風向が変化しないもの。③風速が 2 m/s 以上であること。④周期が 4.6 s 以下であること（沖波とみなすことができること）である。図中の線は大阪湾の検討で得た風波の発達式

$$\begin{aligned} \frac{g^2 E}{U_*^4} &= 1.8 \times 10^{-4} \frac{g F}{U_*^2}, \quad \frac{g^2 E}{U_*^4} \leq 2000 \\ \frac{g^2 E}{U_*^4} &= 2000, \quad \frac{g^2 E}{U_*^4} > 2000 \quad \cdots (5) \end{aligned}$$

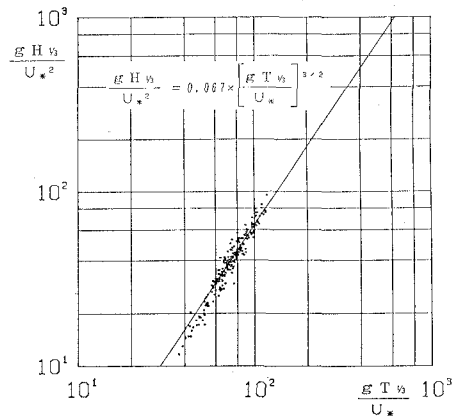


図-5 無次元周期と無次元波高

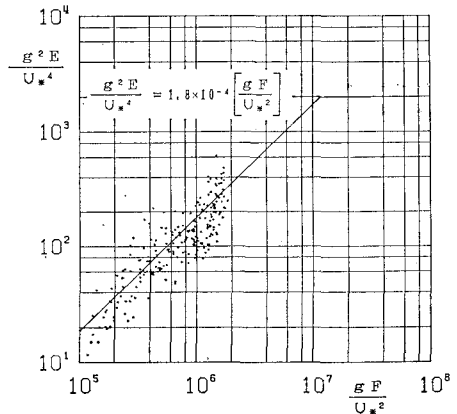


図-6 無次元フェッチと無次元エネルギー

であり、東京灯標の波浪データは大阪湾に比べ多少発達率が大きいようである。

3. 波浪スペクトル

ここでは、昭和68年から昭和63年までの6年間の中から東京港に高波をもたらした10擾乱を選び、約400ケースの周波数スペクトルを解析した。そして、周波数スペクトルの演算結果から JONSWAP スペクトルのパラメータとスペクトルの相似則について検討した。

(1) スペクトルパラメータ

JONSWAP スペクトルは発達過程にある風波の標準スペクトル形として提案され、次式で表される。

$$\begin{aligned} S(f) &= \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \\ &\times \exp[-1.25(f/f_m)^{-4}] \gamma^{\exp[-(1-f/f_m)^2/2\sigma^2]} \quad \cdots (6) \end{aligned}$$

東京灯標のデータから、peak enhancement factor γ および σ_1, σ_2 はパラッキが大きくものの平均的な値として $\gamma=2.0$, $\sigma_1=0.08$, $\sigma_2=0.10$ であり、スケールパ

ラメータ α は無次元エネルギーと負の相関関係にあり、その形は次式となる。

$$\alpha = 0.026 \left(\frac{g^2 E}{U_*^4} \right)^{-0.15} \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、無次元ピーク周波数 $f_m^* (= f_m \cdot U_* / g)$ は、図-7に示してあるように、 $-1/3$ 乗の勾配をもつべき関数

$$f_m^* = 0.057 \left(\frac{g^2 E}{U_*^4} \right)^{-1/3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表される。しかし、両者は無次元エネルギーが 2000 を越えると、式 (7)、式 (8) の関係から外れる傾向を示す。これは、風速が弱くなりもはや風波として存在できなくなり、ピーク周波数が低周波側に移行するためと考えられる。

(2) スペクトルの相似則

風域内で発達過程にある風波のスペクトルが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。ここでは、東京港の波浪スペクトルに関して相似則を検証した結果を述べる。図-8 は波浪の発達、最盛期、減衰、減衰期終盤におけるスペクトルを描いた一例である。各スペクトルの図は規格化して示しており、また、実線は先に求めた JONSWAP スペクトルである。図からわかるように、発達、最盛期にはスペクトルの相似性は非常に良好な精度で成り立ち、JONSWAP スペクトルで相似形が表される。減衰期中盤においても比較的相似性はよく保たれている。しかし、減衰の終盤ではスペクトル形は二カ所のピークをもつ、いわゆる二山形となり、相似形は成り立たない。

4. 一点出力型による推算手法の比較

ここでは、一点出力型パラメータ法による波浪推算モデルとこれを改良したハイブリッド・パラメータ法波浪推算モデルについて検討する。また、有義波法およびスペクトル法についても比較検討のために試算を行っており同時に報告する。なお、一点出力型パラメータ法(後藤ら, 1989, 1990)とスペクトル法および有義波法モデル(後藤ら, 1988)については、既に著者らが報告しているため、ここではハイブリッド・パラメータ法の概要だけを述べる。

(1) ハイブリッド・パラメータ法

ハイブリッド・パラメータ波浪推算モデルは、パラメータモデルにうねりの効果を組み入れた波浪推算手法である。モデルの基本概念は、風波のスペクトルに相似則が成り立ち、一つのパラメータを追跡することによりその経時変化を推定することが可能であると仮定したものである。

風波の周波数スペクトル $S(f)$ に相似則が成り立つと仮定すれば、周波数スペクトル形は次式から求めることができる。

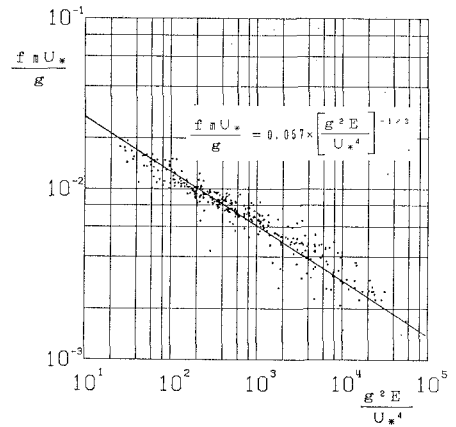


図-7 ピーク周波数と無次元エネルギー

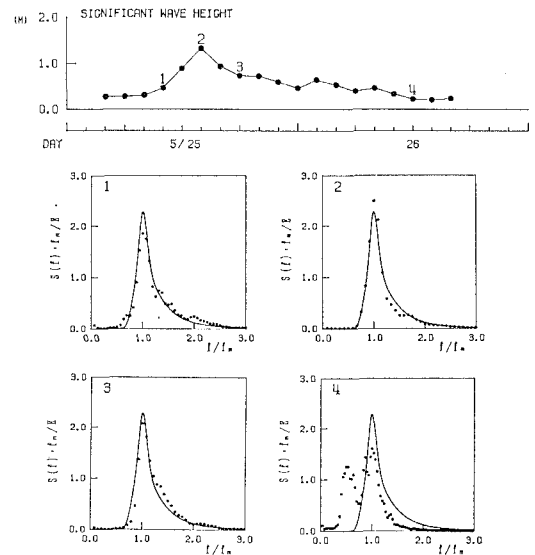


図-8 スペクトル相似則

$$S(f) = \frac{E \cdot S_J(f)}{f_m} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 E はエネルギー、 $S_J(f)$ は JONSWAP スペクトル、 f_m はピーク周波数である。

このような考え方により、ハイブリッド・パラメータ波浪推算モデルは以下のように定式化される。すなわち、

① $(g^2 E / U_*^4) < 2000$ 場合は、風波であるとし、無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則と無次元エネルギーと無次元フェッチの 1 乗則から、エネルギー平衡方程式

$$\frac{\partial E(\theta)}{\partial t} + \bar{C}_g \frac{\partial E(\theta)}{\partial x} = \frac{A}{2\pi} \left[\frac{C}{B} \right] \left[\frac{U_*^3}{g} \right] \cdot \left[\frac{g^2 E(\theta)}{U_*^4 \lambda(\theta)} \right]^{1/3} \lambda(\theta) \quad \dots\dots\dots (10)$$

で方向別のエネルギーの変化を計算する。ここに、 $\bar{C}_g$ は

平均周期に対応する群速度, A は無次元エネルギーと無次元フェッチの1乗則の係数 (1.8×10^{-4}), B は無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則 (0.067), C は 3.83 ($=H_{1/3}/\sqrt{E}$), $\lambda(\theta)$ は方向分布関係を意味し,

$$\lambda(\theta) = (3\pi/8) \cos^4 \theta \dots \dots \dots (11)$$

である.

② ($g^2 E/U_*^4$) > 2000 場合は, 風波からうねりに変化したとみなし, 式 (13) のスペクトルの相似則を用いて風波からうねりへのエネルギーの移行量を算定する. うねりとなったエネルギーはスペクトル成分 $S(f, \theta)$ で表し,

$$\frac{\partial S(f, \theta)}{\partial t} + C_\theta(f) \frac{\partial S(f, \theta)}{\partial x} = -Df^4 S(f, \theta) \dots \dots \dots (12)$$

で伝播し, 減衰するものとする. ここに, D は減衰係数を意味する.

なお, パラメータ法およびハイブリッド・パラメータ法の波浪推算では, 後藤ら (1990) の検討成果をふまえて修正 Mitsuyasu の C_D 則

$$C_D = \begin{cases} (1.014 + 0.007(u_{10} - 5)^2) \times 10^{-3} & U_{10} \geq 8 \text{ m/s} \\ (1.29 + 0.24 U_{10}) \times 10^{-3} & U_{10} < 8 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$U_* = \sqrt{C_D} U_{10} \dots \dots \dots (13)$$

を用いて摩擦速度を算定している.

(2) 試算結果

試算結果の一例として, 解析データの中で最高波高を

記録した昭和60年の台風8506号によるものを報告する. 与える風データは全計算点とも, 東京灯標で観測された風向と U_{23} から前節による補正方法により求めた U_{10} である. また, 各モデルとも方向分割幅, 計算時間間隔, 格子幅はそれぞれ 22.6° , 4分, 2 km とし, スペクトルハイブリッド・パラメータモデルでは周波数分割数は 0.01 Hz に固定した.

図-9 は上から風向・ U_{10} , 推算波向, 観測波高と推算波高, 観測周期と推算周期を示したものである. 図から, パラメータ法およびハイブリッド・パラメータ法の波高に関する推算値は実測値と良好な一致を示すことがわかる. 一方, 有義波法は風速 20 m/s 程度以上を越えると, 実測値に比べ小さめな推算値となる. また, スペクトル法は短フェッチ海域の平衡スペクトル形の問題のため推算値はかなり低いものとなっている. なお, ハイブリッド・パラメータ法においてもピーク波高時の周期が実測値に比べ大きくっており, また減衰時は逆に小さめとなっている. したがって, 今後の課題として周期の推算精度の向上を検討する必要がある.

5. おわりに

得られた主要な結果は以下の通りである.

- ① Wilson 式を用いて波浪諸元から逆に海上風を推算することにより, 設置条件の悪い風速データを海上風に近似することが可能な方法を提案した.
- ② 東京港の風波に関しても無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則は精度よく成立する. また, 係数は大阪湾で導かれた値を支持する.
- ③ 風波のスペクトルには強い相似性があることが検証された. また, その特性は減衰期においてもある程度まで保たれている.

謝辞: 本研究を遂行するにあたり, 日本大学寺中啓一郎教授, 中央大学服部昌太郎教授をはじめとする東京港気象海象特性調査検討会のメンバーに御指導・御助言を頂いた. ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 後藤智明・小舟浩治 (1988): 現地で簡単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.
 後藤智明・末次広児・小舟浩治 (1989): 大阪湾の風と風波の関係, 第36回海岸工学講演会論文集, pp. 168~172.
 後藤智明・末次広児・小舟浩治 (1990): 海上風の抵抗則と風波の発達則, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 170~174.
 Toba, Y. (1985): Wind waves and turbulence, In "Recent Studies of Turbulent Phenomena", eds. T. Tatum, H. Maruo and H. Takami, Assoc. for Sci. Doc., Tokyo, pp. 277~296.

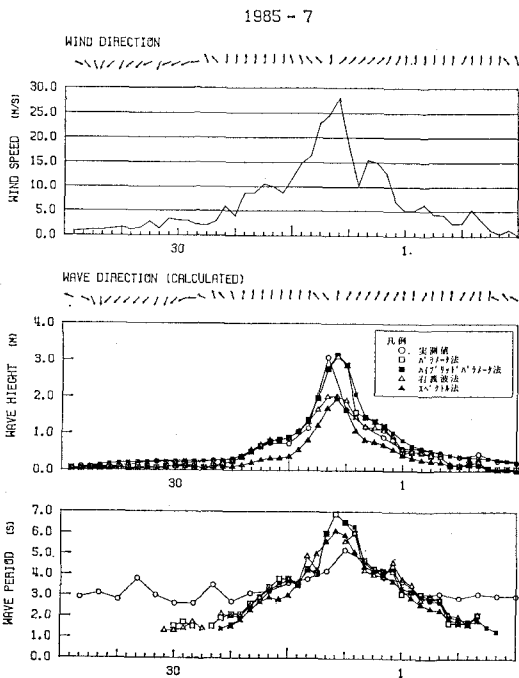


図-9 波浪推算法の比較