

海上風の抵抗則と風波の発達則

後藤 智明*・末次 広児**・小舟 浩治***

1. はじめに

海上風と風波の関係を明らかにすることは、大気と海洋の運動量交換のメカニズムを理解するばかりでなく、港湾構造物の設計および波浪予測のための波浪推算モデルの改良・開発に重要なことである。

風と風波の関係について調べた従来の研究は、Wilson (1965), Mitsuyasu ら (1968), Hasselmann ら (1973) の報告のように 10 m 高度の風で風波の発達則を定式化しているものが多い。最近、より適切であると考えられる風の摩擦速度を用いた整理法が着目され、Mitsuyasu ら (1984), Charnock (1955), Wu (1980), Toba・Koga (1986), Masuda・Kusaba (1987), Toba ら (1990) などにより種々の検討結果が報告されている。しかしながら、これらの研究の多くはスケールが大きく異なる風洞水槽実験によるものであり、現地の観測データによる検討例が少ないという問題点が残されていた。

本文では、大阪湾における観測データを用いて海上風の抵抗則と風波の発達則に関する従来の経験則の検討を行い、パラメータ型波浪推算モデルを開発するにあたり最も適切な海上風の抵抗則と風波の発達則の組み合わせについて考察した結果を報告する。

2. 解析データ

解析に利用したデータは、1984年から1987年の4年間に大阪湾泉州海岸から東方 6.5 km にある海上観測局の超音波式波高計および 10 m 高度のプロベラ型風向・風速計で観測したものである。海上局の観測は関西国際空港の建設のため昭和53年から経常的に実施されているもので、観測記録は毎正時の13分間観測値を波高、周期、風向、風速などの各諸元に整理され保存されている。

3. 代表風速と検証のための波浪推算モデル

(1) 代表風速

一般に、風波の発達特性を記述する風速としては、10 m 高度風速 U_{10} と摩擦速度 U_* がある。10 m 高度風速と摩擦速度との関係は、対数分布則

$$\frac{U_z}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \log \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

を仮定する方法と抵抗係数 C_D により

$$U_* = \sqrt{C_D} U_{10} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と記述するものがある。ここに、 U_z は高度 z の風速を意味し、 κ はカルマン定数、 z_0 は水面粗度である。

対数分布則を適用する方法では、水面粗度を定めるものとして Wu (1980), Toba (1986), Masuda・Kusaba (1987), Toba (1990) が経験式を提案している。

本研究で検討対象とした抵抗則は、 z_0 則として Wu (1980), Toba (1986), Masuda・Kusaba (1987), Toba (1990) の式、 C_D 則の代表的なものとして Mitsuyasu (1984) の式である。なお、Wu (1980) の z_0 則は、

$$\left(\frac{gz_0}{U_*^2} \right) = 1.8 \times 10^{-2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Toba (1986) の z_0 則は、

$$\left(\frac{gz_0}{U_*^2} \right) = 2.5 \times 10^{-2} \left(\frac{\sigma_P U_*}{g} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Masuda・Kusaba (1987) の z_0 則は、

$$\left(\frac{gz_0}{U_*^2} \right) = 1.109 \times 10^{-2} \left(\frac{\sigma_P U_*}{g} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

Toba (1990) の z_0 則は

$$\left(\frac{gz_0}{U_*^2} \right) = 2.0 \times 10^{-2} \left(\frac{\sigma_P U_*}{g} \right)^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Mitsuyasu (1984) の C_D 則は

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024 U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} \leq 8 \text{ m/s}) \\ (0.581 + 0.063 U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} > 8 \text{ m/s}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表される。ここに、 σ_P はスペクトルのピーク周波数

* 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 前運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室 (運輸省第四港湾建設局北九州港工事事務所 第二工事課)
 *** 正員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部 海象調査研究室長

を表し、本研究では $\sigma_p = 2\pi/1.05 T_{1/3}$ と算出している。

(2) 1地点出力パラメータ型波浪推算モデル

次章の抵抗則と発達則の検証方法としてパラメータ型波浪推算モデル（後藤ら, 1989）を利用している。パラメータ型波浪推算モデルとは、無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則および無次元エネルギーと無次元フェッチの 1 乗則を利用して風波を対象としてその発達・減衰をエネルギー平衡方程式を用いて追跡する方法である。なお、1地点出力というのは出力地点を1地点に絞るその対象地点に到達する各波向成分を波向線上の発達・減衰計算を通じ対象地点の波浪の経時変化を算出する方法である。

いま、無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則および無次元エネルギーと無次元フェッチの 1 乗則をそれぞれ

$$\left(\frac{gH_{1/3}}{U^2}\right) = B \left(\frac{gT_{1/3}}{U}\right)^{3/2} \quad (8)$$

および

$$\left(\frac{g^2 E}{U^4}\right) = A \left(\frac{gF}{U^3}\right) \quad (9)$$

とくと、エネルギー平衡方程式は

$$\frac{dE(\theta)}{dt} + C_g \frac{dE(\theta)}{dx} = \frac{A}{4\pi} \left[\frac{C}{B} \right]^{2/3} \left[\frac{U^3}{g} \right] \cdot \left[\frac{g^2 E(\theta)}{U^4 \lambda(\theta)} \right]^{1/3} \lambda(\theta) \quad (10)$$

で表される。ここに、 $C = 3.83 (= H_{1/3} / \sqrt{E})$ であり、 $E(\theta)$ は波向別のエネルギー、 $\lambda(\theta)$ は方向分布関数を意味し、

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

である。数値計算にあたっては、格子間隔を $\Delta x = 1 \text{ km}$ 、 $\Delta t = 120 \text{ s}$ 、 $\Delta \theta = \pi/8$ としている。また、風は大阪湾の広さが 40 km 程度であるため海上局で観測した風向・風速が大阪湾全域にそのまま適用できるものとしている。

4. 無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則

局所平衡下の風波に関しては、無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則が成立することが知られている。 U_{10} を用いる Wilson 式からフェッチにわずかに依存するが、

$$\left(\frac{gH_{1/3}}{U_{10}^2}\right) = B_w \left(\frac{gT_{1/3}}{U_{10}}\right)^{3/2}, \quad B_w = 1.3 \times 10^{-2} \quad (12)$$

が導かれ、Toba (1985) は全く別の観点から独立に

$$\left(\frac{gH_{1/3}}{U_*^2}\right) = B_r \left(\frac{gT_{1/3}}{U_*}\right)^{3/2}, \quad B_r = 6.2 \times 10^{-2} \quad (13)$$

を提案している。

大阪湾海上局の観測データから、風波の条件を課してデータを抽出し、無次元波高と無次元周期の関係を種々の代表風速でプロットした一例が図-1である。図中の

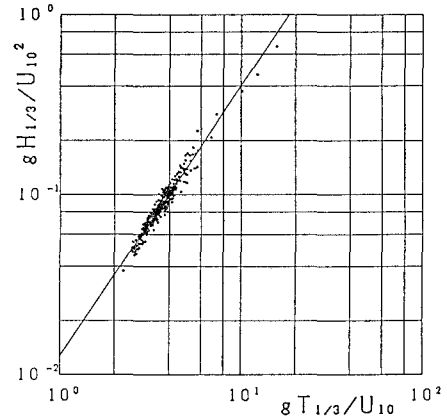


図-1 無次元波高と無次元周期

表-1 代表風速の違いによる係数の差異

	抵抗則	大阪湾	既往提案値
1	Wilson (1947)	0.013	0.013
2	Mitsuyasu (1984)	0.067	-----
3	Toba (1986)	0.054	0.062
4	Wu (1980)	0.067	-----
5	Masuda (1987)	0.078	0.058
6	Toba (1990)	0.061	0.062

実線は最小自乗法で定めた回帰直線であり、良好な精度で無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則を満足することがわかる。ただし、表-1 に示した比較から明らかなように風速の取り方により係数 B の違いが大きい。同表の右欄はそれぞれ既往の係数を記載してあるが、大阪湾の観測値は抵抗則1および抵抗則6をよく支持する結果となる。抵抗則3に関しては既往の提案値に比べ小さめに抵抗則5は大きめになる。特に、抵抗則5の Masuda-Kusaba の z_0 則に関しては現地波浪と差異が大きく、これは既往の係数が水理実験データのみで決められているためであると考えられる。

5. 抵抗則と発達則の検証

(1) 10 m 高度風速

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実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発達則の検討した。図-2 は無次元波高・周期と無次元フェッチの関係を描いたものである。プロットされたデータは風波であるが完全に fetch-limited の状態に達しているものばかりでない。したがって、データの法絡線が fetch-limited の状態に対応しているものと考えられる。図には SMB, Wilson (1965), Mitsuyasu

(1968), Hasselmann (1973) の各提案式を実線で描いている。無次元波高に関してデータの法絡線と各提案式を比べると, SMB および Wilson の式は精度が良いこと, 光易の式は多少大ききであること, そして Hasselmann らの式は小さきであることがわかる。

一方, 無次元周期に関しては, 光易と Hasselmann らの式が大ききであり, SMB と Wilson の式が若干小さきであることがわかる。以上のことから, 光易および Hasselmann らの式に比べ図式解法または有義波法に利用されている SMB および Wilson の式が良好な精度を有することがわかる。

図-3 は Wilson の式を先に述べた推算モデルの発達式として用いた場合の推算例である。推算したものは 1984年1月3日から6日までの擾乱で, 風速 21 m/s 程度と 15 m/s 程度の2つの擾乱が続けて来襲した例である。推算手法が風波を対象としたパラメータモデルであるため, 3日13時以前, 4日15時から23時そして6日4時以降の風が弱くなった時刻に関しては波高, 周期ともに推算値と実測値に差が見られるが, 風速が大きくなると良好な一致を示すことがわかる。ただし, 風速 20 m/s 程度以上に関しては実測値に比べ推算値が小さくなっている。

(2) Toba 則

無次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則の検証から, 大阪湾の風波データは1990年に Toba により提案された z_0 則を満たすことが明らかになった。ここでは, 逆に $3/2$ 乗則の係数が 0.062 であると仮定した場合の Toba の z_0 則の適合度を調べることにした。図-4 がその結果であり, 丸印が大阪湾の観測データを表す。図には, 比較のため水理実験結果, 白浜および Bass 海峡の観測値の分布を同時に示してある。大阪湾の観測データはバラツキが大きいものの, その平均値は白浜の観測値と同様に Toba の z_0 則 ($-1/2$ 乗則) を満たしていることがわかる。

Toba の z_0 則 ($-1/2$ 乗則) を用いて算定した摩擦速度を用いて無次元エネルギーと無次元フェッチの関係を描いたものが図-5 である。先に述べたようにデータの包絡線が fetch-limited の状態を意味するため, 図の実線,

$$\left(\frac{g^2 E}{U^4}\right) = A \left(\frac{g F}{U^2}\right), \quad A = 1.3 \times 10^{-4} \dots \dots \dots (14)$$

が発達式となる。ただし, 無次元フェッチが 10^7 程度で発達式を表す線が折れ曲がっているのは, 波浪推算上の平衡状態を仮定しているためである。なお, 摩擦速度を算出する際に用いた Toba の z_0 則 ($-1/2$ 乗則) が波浪諸元に関係するため, 本来ならばこのような相関をとることには問題があるが, 後に述べるように波諸元によ

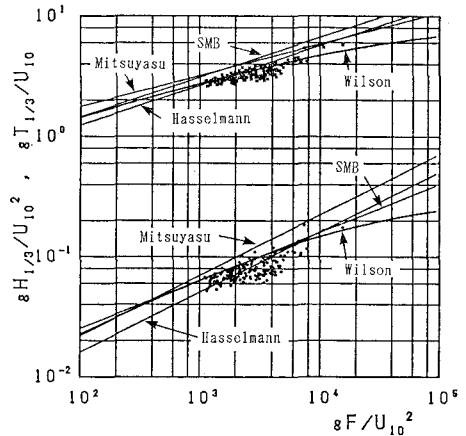


図-2 無次元波高・周期と無次元フェッチ

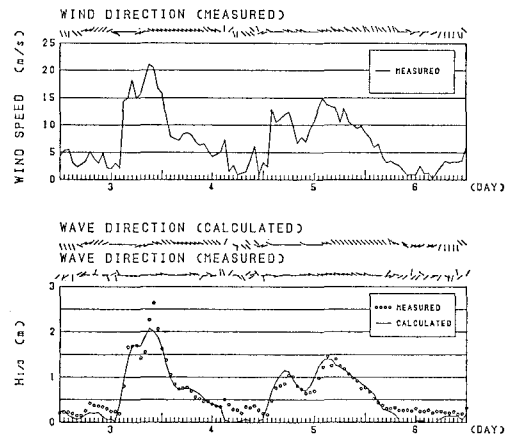


図-3 Wilson 式による推算結果

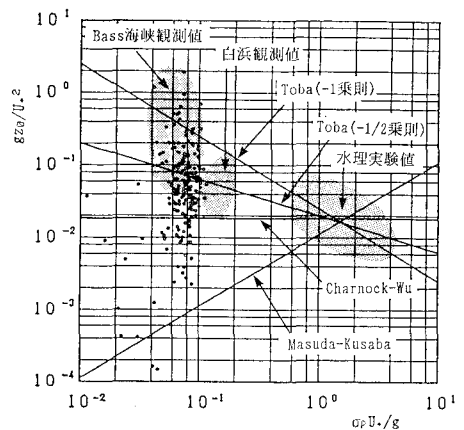


図-4 無次元粗度と無次元ピーク周波数

る摩擦速度の変化量が小さいため発達式が特別おかしいものとはなっていない。

Toba の z_0 則 ($-1/2$ 乗則) による摩擦速度による無

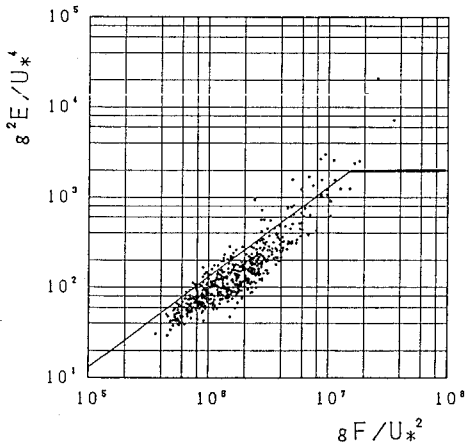


図-5 無次元エネルギーと無次元フェッチ

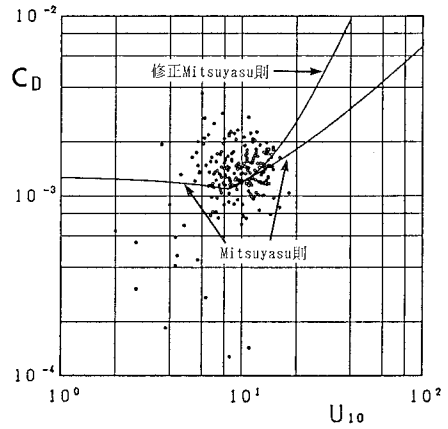
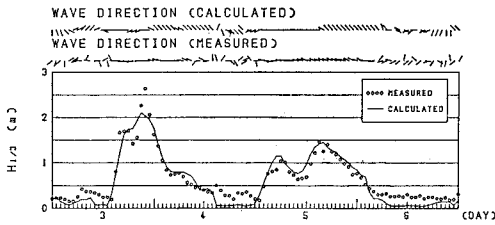


図-7 抵抗係数と10m 高度風速

図-6 Toba の Z_0 則による推算結果

次元波高と無次元周期の $3/2$ 乗則および無次元エネルギーと無次元フェッチの 1 乗則を用いて波浪推算した結果を図-6 に示す。図-3 に示した Wilson 式の場合と同様に風速 15 m/s 程度までの推算値は実測値とよく一致するが、風速 20 m/s を超えるとやはり精度が悪くなっている。したがって、Toba の Z_0 則 ($-1/2$ 乗則) による摩擦速度を用いても従来の Wilson 式より精度の良い推算結果が得られないようである。

(3) Mitsuyasu 則

前節と同様に $3/2$ 乗則の係数を 0.067 に固定して C_D 値を逆算したものを描いたものが図-7 である。Mitsuyasu の C_D 則の適合性については、図-4 と同様にデータのバラツキが大きく確たることは言えない。しかし、局所平衡化の風波に $3/2$ 乗則が成立するならば波諸元に関係しない摩擦抵抗則を用いても大きな問題は無いと思われる。また、図-8 は Toba の Z_0 則 (-1 乗則) から求まる C_D 値と Mitsuyasu の C_D 則を比較したものである。Toba の Z_0 則から算出した C_D 値は周期により異なるが、周期 2 s と 12 s でもその差は約 30% 程度である。したがって、摩擦速度の違いにすると 10% 程度以下であり、波諸元の影響をことさら海上風の抵抗則に取り入れる必要がないと思われる。

図-9 は Mitsuyasu の C_D 則による摩擦速度を用い

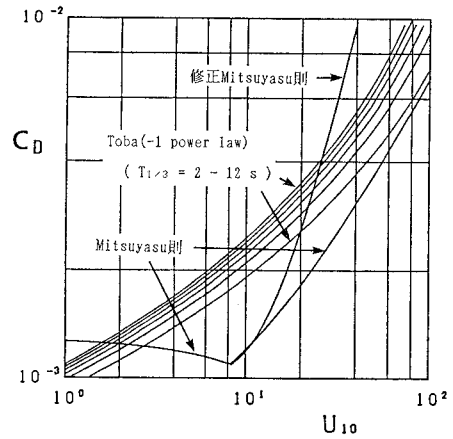
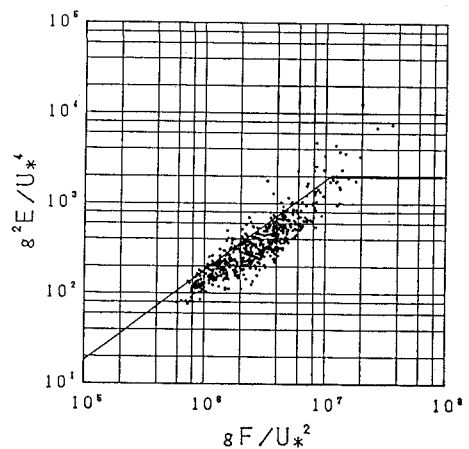
図-8 Toba の Z_0 則と Mitsuyasu の C_D 則の比較

図-9 無次元エネルギーと無次元フェッチ

て無次元エネルギーと無次元フェッチの関係を描いたものである。風波の発達式は

$$\left(\frac{g^2 E}{U^4}\right) = A \left(\frac{g E}{U^2}\right), \quad A = 1.8 \times 10^{-4} \quad \dots\dots (15)$$

で表される。

図-10 は 図-3, 図-6 と同じ擾乱に関して Mitsuyasu の C_D 則による摩擦速度を用いた発達式による推算結果である。Wilson の式, Toba の式の場合と同様に風速 15 m/s までは実測値と推算値に良好な一致が見られる。しかしながら, 20 m/s 程度以上では, やはり推算精度が劣っている。

推算値の補正法のひとつとして, Mitsuyasu の C_D 則を修正する方法が考えられる。ただし, 補正をするにあたり大阪湾の観測値には風速が 20 m/s を超えるものが少ないため, 高風速の観測値で比較的精度が良いと思われる Bass 海峡のデータを用いることにした。Bass 海峡の観測値は風速 25 m/s 程度の風が長時間吹き続けたものであり, Toba (1990) の解析および 図-4, 図-8 を見ると明らかに個々のデータが多少バラツクものの, 平均的には風速 25 m/s で C_D 値が 0.04 程度となる。したがって, Mitsuyasu の C_D 則を Bass 海峡のデータで修正することにより

が求まる。この修正 C_D 則を用いた推算結果を 図-11 に示している。高風速時の推算値が改善され, 全般的に実測値と良好な一致を示す。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

①観測風速 (10 m 高度の海上風) を用いて 無次元波高と無次元周期を整理すると良好な精度で $3/2$ 乗則が成立する。また, SMB, Wilson の発達式に観測データはよく適合する。ただし, このような 10 m 高度の海上風により定式化した発達式を用いた波浪推算結果は, 風速 15 m/s 程度以下であると観測値とよく一致するが, 風速 20 m/s 以上の場合に適合度が悪くなる。

②大阪湾の観測データは Toba (-1 乗則) および Masuda・Kusaba の抵抗則との適合性はあまりよくなく, Toba ($-1/2$ 乗則) に近い。Toba ($-1/2$ 乗則) の抵抗則を用いた波浪推算結果は, ①の場合と同様に風速 15 m/s 程度以下であると観測値とよく一致するが, 風速 20 m/s 以上の場合に適合度が悪くなる。

③Mitsuyasu の抵抗則を用いた推算値も Wilson および Toba 海峡のデータを用いて修正した Mitsuyasu の抵抗則を用いると風速 20 m/s 以上に関しても実測値とよく合致する推算結果が得られる。

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。また, 本研究を行うにあたり, 東北大学工学部首藤仲夫教授および理学部鳥羽良明教授から御指導, 御助言を得た。ここに記して謝意を表す。

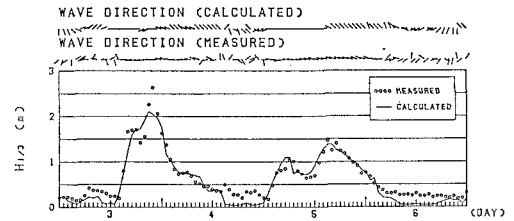


図-10 Mitsuyasu の C_D 則による推算結果

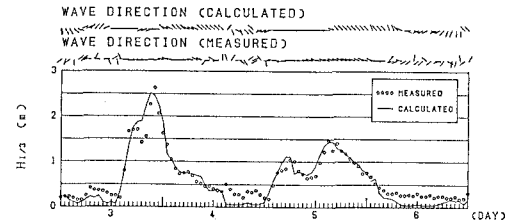


図-11 修正 Mitsuyasu の C_D 則による推算結果

参考文献

- 後藤智明・末次広児・小舟浩治 (1989): 大阪湾の風と風波の関係, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 168~172.
- Charnock, H. (1955): Wind stress on a water surface, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 81, pp. 639~640.
- Hasselmann, K. et al. (1973): Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deut. Hydrgr. Z., Suppl. 8, pp. 1~95.
- Masuda, A. and T. Kusaba (1987): On the local equilibrium of winds and wind-waves in relation to surface drag, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 43, pp. 28~36.
- Mitsuyasu, H. (1968): On the growth of the spectrum of wind generated waves (I), Rep. Ints. Mech. Kyushu Univ., Vol. 16, pp. 459~482.
- Mitsuyasu, H. and T. Kusaba (1984): Drag coefficient over water surface under the action of strong wind, J. Natural Dias. Sci., Vol. 6, No. 2, pp. 43~50.
- Mitsuyasu, H., R. Nakamura and T. Komori (1971): Observation of the wind and waves in Hakata Bay, Rep. Int. Appl. Mech. Kyushu Univ., Vol. 19, pp. 37~74.
- Toba, Y. (1985): Wind waves and turbulence, In "Recent Studies of Turbulent Phenomena", eds. T. Tatsumi, H. Maruo and H. Takami, Assoc. for Sci. Doc., Tokyo, pp. 277~296.
- Toba, Y. and M. Koga (1986): A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress, In "Oceanic Whitecaps" eds. E. C. Monahan, G. Mac Niocaill and D. Reid, pp. 37~47.
- Toba, Y., N. Iida and I. S. F. Jones (1990): The wave dependence of sea-surface wind stress, J. Phys. Oceanogr. Roc. Japan, in press.
- Wilson, B. W. (1965): Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, Deut. Hydrgr., Vol. 18, pp. 114~130.
- Wu, J. (1980): Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions-a revisit, J. Phys. Oceanogr., Vol. 10, pp. 727~740.