

海面抵抗係数と Toba 定数の変動に関する考察

Variability of Sea Drag Coefficient and Toba Constant in the 3/2-Power Law between Significant Wave Height and Wave Period

山口正隆*・野中浩一**・畑田佳男***

Masataka YAMAGUCHI*, Hirokazu NONAKA** and Yoshio HATADA***

Based on the results of Takagaki et al.(2012) augmented with Iwano et al.(2013) followed by other results of the previous studies, this paper discusses variability of both the sea drag coefficient C_d and the Toba constant B_T in the 3/2-power law between significant wave height H_s and period T_s . Some of the main conclusions are summarized below. (1)The Takagaki et al.(2012) results with respect to upper limits of C_d , wave statistics $E f_p^3 / g$ ($E = H_s^2 / 16$: wave energy, f_p : peak frequency and g : acceleration of gravity) and roughness length z_0 in addition to a relation between z_0 -based dimensionless wave energy \hat{E} and peak frequency \hat{f}_p may be verified at a significant level by the comparison with some of the published experiments and observations (PEOs). (2)The Takagaki et al.(2012) study with Iwano et al.(2013) suggests a weak dependence of the Toba constant on friction velocity u_* less than 1.70 m/s and a strong dependence on friction velocity u_* greater than 1.70 m/s. But the PEOs for $u_* < 1.70$ m/s do not necessarily support a tendency of weak dependency due to a significant scatter of the individual data. (3) Mean of the PEOs-based Toba coefficient (B) samples is 0.062 which is coincident with the original value of $B_T = 0.062$ and standard deviation is 0.009, while variability ranges from 0.053 to 0.071. (4) The Takagaki et al.(2012)-based analyses are conducted for $N_t = 28,430$ data samples of H_s , T_s and z m-height wind speed U_z extracted under the conditions of ① deep water waves, ② reasonable measurement accuracy and ③ acceptable (quasi-) stationarity from about 870,000 data samples gathered at 17 measurement stations in local winds-dominated water areas. Total mean B_m of the Toba coefficient B is 0.0586, a little smaller than the original value of $B_T = 0.062$, in cases where station-separated mean varies from 0.0463 to 0.0679 and mean B_m of u_* -segment-separated B data samples may happen to yield a tendency of weak decrease with increase of segment-averaged u_* , as indicated by the Takagaki et al.(2012) results. (5) Estimate of the Toba coefficient B changes depending on a C_d law to be applied in cases where u_* is calculated from measured U_z . The mean value ranges from 0.0586 to 0.0625 when any of the 6 C_d formulae is used for the above-mentioned data samples.

*愛媛大学名誉教授

Prof. Emeritus, Ehime University

** (前) 愛媛大学工学部環境建設工学科

(former) Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ehime University

***愛媛大学大学院理工学研究科 (工学系) 生産環境工学専攻

Engineering for Production and Environment, Graduate School of Science and Engineering, Ehime University

原稿受理 平成 26 年 10 月 31 日

Key Words ; sea drag coefficient, Toba constant, 3/2-power law, measurements, wind speeds, wave heights and periods, local winds-generated waves

1. 結 言

大気海洋間の運動量輸送を代表するパラメータである海面抵抗係数 C_d に関して非常に多くの研究が積み重ねられた結果、その風速依存性などが明らかにされてきたが、最近では 10 m 高度風速 U_{10} が 30~40 m/s 以上の超強風速時における挙動が注目されている。すなわち、Donelan ら^[1]は $U_{10} > 33$ m/s で C_d がほぼ一定値をとる特性を実験結果に基づき、Powell ら^[2]は $U_{10} > 40$ m/s で C_d がピーク値をとったのち減少する特性を観測結果に基づいて示している。その挙動は両者の場合で異なるものの、ピーク値をとること (capping) で両者の特性は共通する。続いて、Takagaki ら^[3]は風洞水槽における精密な実験に基づいて、 $U_{10} > 35.0$ m/s で C_d や波浪特性量 Ef_p^3/g (E : 波浪エネルギー、 f_p : 周波数スペクトルのピーク周波数、 g : 重力加速度) が上限値 (一定値) をとる特性や粗度長 z_0 と Ef_p^3/g の関係および Ef_p^3/g と U_{10} の関係を与えた。また、Iwano ら^[4]は Takagaki ら^[3]の結果に対して風速の限界区分を $U_{10} > 33.6$ m/s とするとともに、 C_d に対する U_{10} のべき乗型近似式を提示した。

一方、発達過程における風波の有義波高 (H_s)、有義波周期 (T_s) および成因となる風の摩擦速度 u_* の間に Toba^[5]の 3/2 乗則 (Toba 定数 $B_T = 0.062$) が成り立つことが知られており、この関係の妥当性の確認が風洞水槽や紀伊水道南部沿岸の白浜観測塔における測定記録の解析に基づいて行われた。その際、Toba 定数 B_T の変動が議論されてきたことはあまりない。Takagaki ら^[3]で与えられた波浪特性量 Ef_p^3/g ($E = H_s^2/16$, $f_p = 1/T_p$, T_p : スペクトルのピーク周期)は、 $T_p = 1.05T_s$ とすれば Toba^[5]の 3/2 乗則における波浪特性量と対応することから、Toba 定数 B_T の変動を含めて両者の関係を検討できる。

本研究では、Takagaki ら^[3]の結果を既存の実験・観測資料を用いて再検証するとともに、Takagaki ら^[3]による C_d およびこれを近似した Iwano ら^[4]による C_d の特性と既往の Wu^[6]や Mitsuyasu・Kusaba^[7]による C_d との比較・検討を行う。ついで、Takagaki ら^[3]と Iwano ら^[4]の結果から導かれる波高・周期の 3/2 乗則と Toba^[5]による本来の 3/2 乗則あるいは光易^[8]あるいは Wilson^[9]に基づく 3/2 乗則との関係を u_* 表示に基づく Toba 係数 B および U_{10} 表示に基づく Toba 係数 B_{10} に着目して考察する。続いて、内湾・内海における観測資料を用いて Toba 係数 B および Toba 係数 B_{10} とそれらの変動特性を検討する。ここでは、Toba^[5]による 0.062 を Toba 定数 B_T 、この値以外の B およびすべての B_{10} を Toba 係数と称する。なお、本文の執筆後検討を進めた結果を付録 A~F で述べる。

2. Takagaki ら^[3]および Iwano ら^[4]の解析結果に基づく検討

(1) 海面抵抗係数 C_d の特性

大気安定度が中立状態の場合、高度 z の風速 U_z は対数則で表される。

$$U_z/u_* = (1/\kappa) \log(z/z_0) \quad (1)$$

ここに、 $\kappa (= 0.4)$: Karman 定数、 z_0 : 粗度長、である。また、10 m 高度風速を U_{10} 、摩擦速度を u_* として

$$u_*^2 = C_d U_{10}^2 \quad \text{あるいは} \quad C_d = (u_*/U_{10})^2 \quad (2)$$

で定義される海面抵抗係数 C_d は次式になる。

$$C_d = \{\kappa/\log(10/z_0)\}^2 \quad (3)$$

さらに、 U_z と U_{10} の関係は C_d を介して次式 (Iwano ら^[4]) で表される。

$$U_z = \{1 + 2.5C_d^{1/2} \log(z/10)\}U_{10} \quad (4)$$

したがって、 C_d が U_{10} の関数で与えられる場合には U_{10} から U_z を直接計算できるし、 U_{10} と U_z の数値表を

利用すれば、 U_z から U_{10} を補間推定できる。

さて、無次元粗度長 gz_0/u_*^2 は定数 α_{ch} (Charnock 係数) か波齡 (C_p/u_*) (C_p : スペクトルのピーク周期に対する波速) のベキ関数で表されてきたが、Takagaki ら^[3]は彼等の 10 高度換算風速 $U_{10} \approx 70$ m/s に及ぶ広範囲の風速条件に対する風洞水槽実験の結果や白浜での現地観測結果および既往の観測結果を解析・整理し、次元解析に基づいて z_0 に関するつぎの結果を得た。

$$z_0 = \gamma^{-2} E^2 f_p^6 g^{-3} = 6.9 \times 10^5 E^2 f_p^6 g^{-3} \leq 0.363 \text{ cm} \quad (5)$$

あるいは

$$\hat{E} = \gamma \hat{f}_p^{-3}; \hat{E} = E/z_0^2, \hat{f}_p = f_p(z_0/g)^{1/2}, \gamma^{-2} = 6.9 \times 10^5, \gamma = 1.2 \times 10^{-3} \quad (6)$$

式(5)では、粗度長 z_0 は波浪特性量 Ef_p^3/g の2乗に比例する。式(5)を式(3)に代入すれば、 C_d の算定式が次式で得られる。

$$C_d = \{\kappa/\log(10\gamma^2 g^3 E^{-2} f_p^{-6})\}^2 \quad (7)$$

Takagaki ら^[3]およびこの論文に対する 8 人の著者のうち 4 名の著者からなる Iwano ら^[4]によれば、実験結果に基づく C_d は $U_{10} \geq 33.6$ m/s で一定値 2.55×10^{-3} をとることから、 C_d 式 (Taka1 と略記) は次式のように書かれる。

$$C_d = \begin{cases} [0.4/\log\{1.42 \times 10^{-4}(Ef_p^3/g)^{-2}\}]^2 & ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (8)$$

$C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ ($U_{10} \geq 33.6$ m/s) に対応する Ef_p^3/g (の上限値) は式(8)の第 1 式=第 2 式として

$$Ef_p^3/g = 2.27 \times 10^{-4}; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \quad (9)$$

になる。式(5)における z_0 の上限値 0.363 cm は式(9)を式(5)に代入して求められる。Takagaki ら^[3]の実験結果によれば、 $U_{10} < 33.6$ m/s では Ef_p^3/g は U_{10} と直線関係を示す。 $U_{10} = 33.6$ m/s で 2.27×10^{-4} (= $6.75 \times 10^{-6} \times 33.6$) をとるように係数を決定すれば、つぎの直線式が得られる。

$$Ef_p^3/g = 6.75 \times 10^{-6} U_{10}; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \quad (10)$$

したがって、式(10)を式(8)の第 1 式に代入すれば、10 m 高度風速 U_{10} の関数として表される次の C_d 式 (Taka2) が得られる。

$$C_d = \begin{cases} \{0.4/\log(3.10 \times 10^6/U_{10}^2)\}^2 & ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (11)$$

続いて、Iwano ら^[4]は式(11)に対する近似式として次式 (Iwano) を提案している。

$$C_d = \begin{cases} 4.40 \times 10^{-4} U_{10}^{1/2}; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)第 1 式の式(11)第 1 式に対する相対誤差は $U_{10} = 32.5$ m/s に対して-0.05%, 17.5 m/s に対して-2.2%, 10 m/s に対して-7.0%, 5 m/s に対して-15%と絶対値が単調増加し、その近似度は U_{10} の減少とともに急速に低下する。これを改善するために、 $U_{10} = 33.6$ m/s で $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ の制約条件のもとに $U_{10} = 2.5 \sim 32.5$ m/s (2.5 m/s 間隔) に対して求めた最小 2 乗法 (付録 B で述べる (b) 法にあたる) に基づく $C_d = 5.58 \times 10^{-4} U_{10}^{0.432}$ によれば、相対誤差は $U_{10} = 32.5$ m/s に対して 0.03%, 17.5 m/s に対して 2.1%, 10 m/s に対して 0.86%, 5 m/s に対して-3.9%となり、かなりの改善がみられる。この場合、以下に現れる式(18) ($22.0u_*^{-0.2}$ から $21.7u_*^{-0.178}$ へ)、式(21) (右辺最後 $22.0u_*^{-0.2}$ から $21.7u_*^{-0.178}$ へ)、式(22) ($5.24 \times 10^{-2}u_*^{-0.1}$ から $5.21 \times 10^{-2}u_*^{-0.089}$ へ)、式(44)の第 1 式 ($1.49 \times 10^{-4}/u_*^{0.2}$ から $1.46 \times 10^{-4}/u_*^{0.178}$ へ) の形が変わり、各式の u_* への依存性がやや弱くなるが、その基本特性に変化はないので、ここでは式(12)の第 1 式をそのまま使用する。なお、 C_d 式(11)の第 1 式に対する上記の修正式 ($C_d = 5.58 \times 10^{-4} U_{10}^{0.432}$) の近似度が式(12)の第 1 式と比べて向上し、 B の推定値が若干減少することから、修正式を適用する場合、後出する Table 7 の最終行の結果 (Iwano) は、たとえば $B_m = 0.0603$ から 0.0591 へと変化し、Taka2 の結果 (この場合 $B_m = 0.0591$) に近づく。

Takagaki ら^[3]および Iwano ら^[4]の各式 (z_0 , Ef_p^3/g , C_d) の特徴は $U_{10} \geq 33.6$ m/s で一定値をとる点にあり、粗度長 z_0 は 0.363 cm, Ef_p^3/g は 2.27×10^{-4} ($= 6.75 \times 10^{-6} \times 33.6$) m/s, C_d は 2.55×10^{-3} をそれぞれ上限値とする。実験・観測結果から得られたこれらの値が 10~20 % のばらつきを伴うのは言うまでもない。なお、式(5)から z_0/H_s と波形勾配 H_s/L_s (L_s : 有義波周期に対応する波長) の関係が Takagaki ら^[3]により

$$(z_0/H_s)^{1/2} \propto (H_s/L_s)^{3/2} \quad (13)$$

として導かれている。

Table 1 は U_{10} に対する既存の C_d 式による値の一覧を与える。用いた C_d 式は Takagaki ら^[3]による式(11) (Taka2), Iwano ら^[4]による式(12) (Iwano) のほか Wu^[6]による式(14) (Wu) と Mitsuyasu・Kusaba^[7]による式(15) (MK1) および U_{10} のベキ乗型式(16) (MK2) に加えて、Iwano ら^[4]による式(12)の第1式に対する修正式 (IwanoC) である。

Table 1 Change of C_d value with increase of 10 m height wind speed U_{10} for any of 6 C_d laws.

U_{10} (m/s)	$C_d \times 10^3$					
	Wu	MK1	MK2	Taka2	Iwano	IwanoC
5	1.13	1.09	1.01	1.16	0.98	1.12
8	1.32	1.09	1.01	1.37	1.24	1.37
10	1.45	1.21	1.17	1.50	1.39	1.51
15	1.78	1.53	1.53	1.76	1.70	1.80
20	2.10	1.84	1.84	2.00	1.97	2.04
25	2.43	2.16	2.13	2.21	2.20	2.24
27.5	2.59	2.31	2.27	2.31	2.31	2.34
30	2.75	2.47	2.40	2.41	2.41	2.43
32.5	2.91	2.63	2.53	2.51	2.51	2.51
35	3.08	2.79	2.66	2.55	2.55	2.55

$$C_d = (0.8 + 0.065U_{10}) \times 10^{-3}; U_{10} > 1 \text{ m/s} \quad (14)$$

$$C_d = \begin{cases} (0.581 + 0.063U_{10}) \times 10^{-3}; U_{10} = 8 \sim 35 \text{ m/s} \\ 1.09 \times 10^{-3}; U_{10} < 8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (15)$$

$$C_d = \begin{cases} 2.60 \times 10^{-4} U_{10}^{0.654}; U_{10} = 8 \sim 35 \text{ m/s} \\ 1.01 \times 10^{-3}; U_{10} < 8 \text{ m/s} \end{cases} \quad (16)$$

ここでは Mitsuyasu・Kusaba^[7]による式(15)と式(16)では $U_{10} < 8$ m/s の場合、 $U_{10} = 8$ m/s に対して得た値をそれぞれの第2式として与えている。

これらの結果を $U_{10} > 20$ m/s の強風域で見ると、Wu^[6]の式が終始最も大きい値を与え、Takagaki ら^[3]の式(11) (Taka2) と Iwano ら^[4]の式(12) (Iwano) がこれに次ぐ。Takagaki ら^[3]の式 (Taka2) と Iwano ら^[4]の式 (Iwano) による C_d は U_{10} の増加とともに差を縮めて、同一の値に漸近し、 $U_{10} > 25$ m/s では両者の C_d に関する差は実際上無視しうる。Mitsuyasu・Kusaba^[7]の式(15) (MK1) は $U_{10} \leq 25$ m/s で式(16)を除く他の式より小さい C_d を与えるが、 $U_{10} > 27.5$ m/s では Takagaki ら^[3]の式 (Taka2) や Iwano ら^[4]の式 (Iwano) による値を上まわる。Mitsuyasu・Kusaba^[7]のベキ乗型式(16) (MK2) による値は $U_{10} = 15$ m/s と 20 m/s で式(15)による値と一致するが、それ以外では U_{10} の増大あるいは減少とともに式(15)による値より小さくなる。なお、Iwano ら^[4]の式(12)第1式に対する修正式 (IwanoC) は Takagaki ら^[3]の

式(11) (Taka2) と同程度の値を与える (高い近似度) ことから, 以下では検討対象としない。

続いて, Takagaki ら^[3]の式(11) (Taka2) や Iwano ら^[4]の式(12) (Iwano) において, $U_{10} \geq 33.6$ m/s で $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ であるから, $U_{10} = 33.6$ m/s に対応する摩擦速度は $u_* = 1.70$ m/s になる。すなわち,

$$U_{10} = 19.8u_* ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \quad (17)$$

一方, $U_{10} < 33.6$ m/s において式(11)の第1式で与えられる C_d 式は対数関数を含む形になっているので, 表示が簡単な式(12)の第1式によれば,

$$U_{10} = \{1/(4.40 \times 10^{-4})\}^{0.4} u_*^{0.8} = (22.0u_*^{-0.2})u_* ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \quad (18)$$

が得られる。 u_* から U_{10} への変換係数は u_* の増加とともに減少する。

(2) 既往の実験・観測結果との比較

鈴木・鳥羽^[10]は既往の多くの実験・観測結果を収集するとともに, 風波飽和度の概念を用いた C_d の整理を行っている。ここでは, 鈴木・鳥羽^[10]の論文に記載された既往の多くの実験・観測結果のうち, 採択条件として u_* , z_0 , C_d , f_p , H_s , T_s が与えられた Toba (1961, 1972), Masuda・Kusaba (1987), Banner・Peirson (1998) による実験結果 (資料数 $N = 48$) と, Kawai ら (1977), Merzi・Graf (1985) による現地観測結果 ($N = 77$) を用い, Takagaki ら^[3]の結果に対する検討を行う。現地観測結果は深海波条件 ($h/L_0 > 0.5$, $L_0 = 1.56T_s^2$) をほぼ満たす。なお, ここでの採択条件を満たしている Hamada (1963), Kunishi (1963), Kunishi・Imasato (1966) による実験結果は, 1970 年以前の古い時代における測定精度の限界などのため, 採択資料の結果と異なる挙動をとることから, 使用しなかった。とくに Kunishi・Imasato (1966) の資料には 10 m 高度換算風速 U_{10} で 80 m/s を越える資料もあるが, C_d が U_{10} とともに単調増加する挙動をとり, 最近の結果と整合しないことが不採択の理由である。また, Johnson ら (1998) の観測結果は Takagaki ら^[3]による回帰式の作成に使用されているため, 不使用とした。この結果, 実験・観測結果 ($N_t = 125$) の U_{10} の最大値は 25.5 m/s とやや低い値になった。

Fig. 1 は(a) C_d と U_{10} , (b) Ef_p^3/g と U_{10} , (c) z_0 と U_{10} の関係を示す。各図にはそれぞれの上限值を与える。 C_d と z_0 に関しては実験値 (Toba, Masuda・Kusaba, Banner・Peirson) と観測値 (Kawai, Merzi・Graf) で各挙動が 2 分されており, Ef_p^3/g についてもその傾向がみられなくはない。実験結果では C_d , Ef_p^3/g , z_0 は U_{10} とともに増加する傾向にあるが, 観測結果では U_{10} への依存性が弱い。上限値でみれば, 各実験・観測値は $C_d \times 10^3 < 2.55$, $Ef_p^3/g \times 10^4 < 2.27$ (Toba^[5]による 1 例を除く), $z_0 < 3.63 \times 10^{-3}$ m (限界値よりやや大きい 3 例を除く), の条件を満たす。

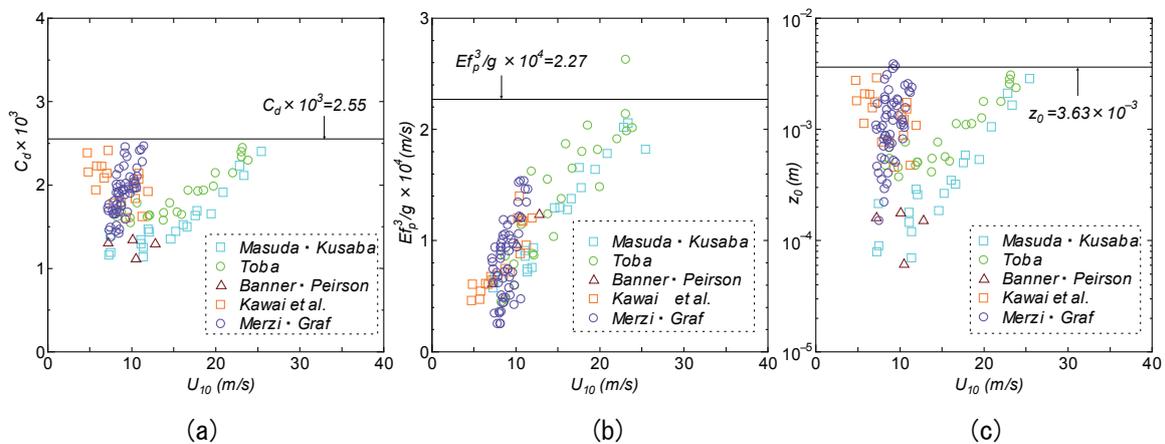


Fig. 1 (a) $C_d - U_{10}$ relation, (b) $Ef_p^3/g - U_{10}$ relation and (c) $z_0 - U_{10}$ relation based on experiments and in-situ observations.

Fig. 2 は \hat{E} ($= E/z_0^2$) と \hat{f}_p ($= f_p(z_0/g)^{1/2}$) の関係を示す。両者の関係は式(6)によってほぼ近似されるが、詳細には実験値は式(6)より大きめの値を、観測値は式(6)より小さめの値をとる傾向にある。

H_s , T_s , U_{10} を入力条件として与える場合, $E = H_s^2/16$, $f_p = 1/T_p$, $T_p = 1.05T_s$ として式(5)から z_{ocal} が、式(1)から u_{*cal} が求められる。Fig. 3 は (a) z_0 および (b) u_* に対する計算値と実験・観測値の比較を示す。添え字 'cal' は計算値を表す。 z_0 に関して資料値は 45° 直線のまわりに大きくばらつく。一方, u_* に関して計算値と実験・観測値との対応は比較的良好である。また、いずれについても実験結果では計算値が実験値より大きく (u_* では 10% 程度)、観測結果では計算値が観測値より小さい (u_* では 3% 程度) 傾向にある。すなわち、 u_* に対する計算値は実験値より観測値の場合によく符合する。

以上のように、 C_d , $E f_p^3/g$, z_0 の U_{10} に伴う増加傾向と上限値、式(6)で表される \hat{E} と \hat{f}_p の関係および u_* に対する計算値と実験・観測値の対応に関して Takagaki ら^[3]の妥当性がある程度検証されたと言える。

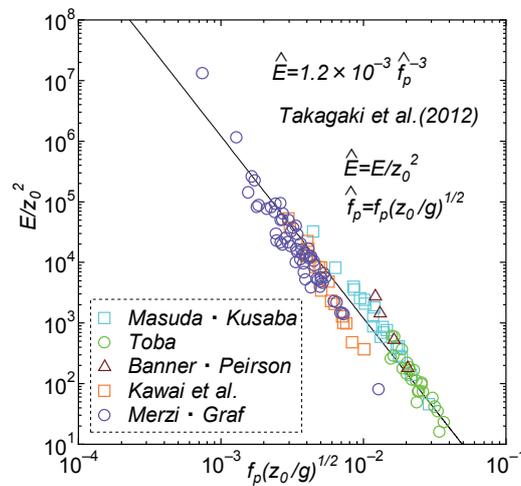


Fig. 2 Relation between \hat{E} ($= E/z_0^2$) and \hat{f}_p ($= f_p(z_0/g)^{1/2}$) based on experiments and in-situ observations.

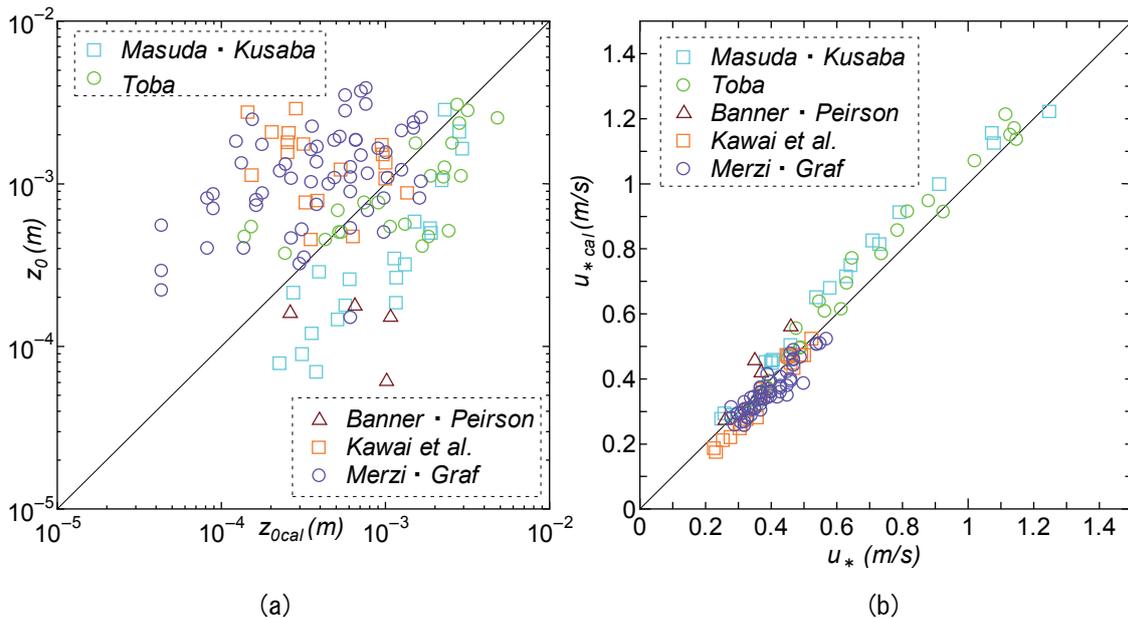


Fig. 3 Comparisons between calculations and measurements for (a) z_0 and (b) u_*

(3) Toba 係数の検討

$E = H_s^2/16$, $f_p = 1/T_p$, $T_p = 1.05T_s$ として、式(10)の左辺を

$$\frac{E f_p^3}{g} = \frac{U_{10}}{16} \left(\frac{gH_s}{U_{10}^2} \right)^2 \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{-3} \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^{-3} \quad (19)$$

と変形したのち、右辺の中の2番目と3番目の項を u_* 表示に変換すれば次式になる。

$$\frac{E f_p^3}{g} = \frac{U_{10}}{16 \times 1.05^3} \left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{-3} \left(\frac{u_*}{U_{10}} \right) \quad (20)$$

したがって、式(10)、式(18)、式(20)から次の2つの式が続いて得られる。

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{-3} = 6.75 \times 10^{-6} \times 16 \times 1.05^3 \left(\frac{U_{10}}{u_*} \right) = 1.25 \times 10^{-4} \times 22.0 u_*^{-0.2} \quad (21)$$

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 5.24 \times 10^{-2} u_*^{-0.1} \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{3/2} ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \quad (22)$$

また、 $u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$ の場合、

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 4.97 \times 10^{-2} \left(\frac{1.70}{u_*} \right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{3/2} ; u_* \geq 1.70 \text{ (m/s)} \quad (23)$$

である。これは式(9)、式(17)、式(20)から求まる次式による。

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{-3} = \frac{2.27 \times 10^{-4} \times 16 \times 1.05^3}{(u_*/U_{10})U_{10}} = 24.7 \times 10^{-4} \times 1.70/u_* \quad (24)$$

式(22)と式(23)の右辺の $(gT_s/u_*)^{3/2}$ の前の項の係数 (Toba 係数 B) は $u_* = 1.70$ で $B = 4.97 \times 10^{-2}$ をとり、一致する。一方、Toba^[5]の3/2乗則は次式で与えられる。

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 6.2 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{3/2} = B_T \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{3/2}, \quad B_T = 6.2 \times 10^{-2} \quad (25)$$

式(22)および式(23)と式(25)は同形であるが、式(25)に与える本来のToba^[5]の3/2乗則ではToba係数は $B_T = 0.062$ と定数であるに対して、Takagakiら^[3]とIwanoら^[4]の式に基づく式(22)と式(23)では右辺のToba係数 B は u_* の関数になる。これは係数が u_* に依存する $U_{10} - u_*$ 関係 (C_d 式)の使用に起因する。因みに、 C_d 式の係数が定数の場合、 $C_d = 1.0 \times 10^{-3}$ では $B = 0.0629$ 、 $C_d = 1.6 \times 10^{-3}$ では $B = 0.0591$ 、 $C_d = 2.5 \times 10^{-3}$ では $B = 0.0500$ をとる。一方、式(22) ($u_* < 1.70 \text{ m/s}$)ではToba係数 B は u_* とともに緩やかに減少するのに対して、式(23) ($u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$)ではより強く減少する。すなわち、式(22)は弱い意味で、式(23)は強い意味でToba^[5]の3/2乗則が成立しないことを表す。

Table 2は式(22)および式(23)に基づくToba係数 B の値を各 u_* に対してそれぞれ式(18)および式(17)による U_{10} とともに与える。式(22)のToba係数 B は u_* とともに減少し、 $u_* = 0.186 \text{ m/s}$ (式(18)から $U_{10} = 5.73 \text{ m/s}$)でToba定数 $B_T = 6.2 \times 10^{-2}$ に、 $u_* = 1.70 \text{ m/s}$ ($U_{10} = 33.6 \text{ m/s}$)で $B = 4.97 \times 10^{-2}$ になる。また、 $u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$ のうち、たとえば $u_* = 3.00 \text{ m/s}$ (式(17)から $U_{10} = 59.4 \text{ m/s}$)で $B = 3.74 \times 10^{-2}$ とToba定数 $B_T = 6.2 \times 10^{-2}$ の60%に減少する。

ここで、実験から得られた $E f_p^3/g$ を δ とすると、式(20)よりToba係数 B の算定式が得られる。

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right) \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{-3/2} = B = \left(\frac{18.522\delta}{u_*} \right)^{1/2} \quad (26)$$

Fig. 4は式(22)におけるToba係数 $B = 5.24 \times 10^{-2} u_*^{-0.1}$ ($u_* < 1.70 \text{ m/s}$)と式(23)における $B = 4.97 \times 10^{-2} (1.70/u_*)^{1/2}$ ($u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$)を接続したToba係数 B の経験曲線をTakagakiら^[3]の実験値 ($E f_p^3/g$ と u_*)に対して式(26)より求めた B の実験値と比較したものであり、(a)図では u_* の観測値を横軸、 u_* と δ による $B(u_*)$ を縦軸、(b)図では $E f_p^3/g$ と U_{10} の実験値に対して式(5)と式(3)、式(2)により求めた u_* の計算値 u_{*cal} を横軸、 u_{*cal} と δ による $B(u_{*cal})$ を縦軸としている。これらの図では u_* 、 U_{10} 、 $E f_p^3/g$ の実験値が得られるケースを●印で、 U_{10} 、 $E f_p^3/g$ の実験値が得られるケースを*印で表している。記号の

Table 2 Change of Toba coefficient B based on both Takagaki et al.^[3] equation and Iwano et al.^[4] equation with increase of friction velocity u_* .

u_* (m/s)	U_{10} (m/s)	eq.(22) $B \times 10^2$	u_* (m/s)	U_{10} (m/s)	eq.(24) $B \times 10^2$
0.10	3.49	6.60	4.00	79.2	3.24
0.15	4.82	6.33	3.50	69.3	3.46
0.25	7.26	6.02	3.00	59.4	3.74
0.50	12.6	5.62	2.50	49.5	4.10
1.00	22.0	5.24	2.00	39.6	4.58
1.70	33.6	4.97	1.70	33.6	4.97

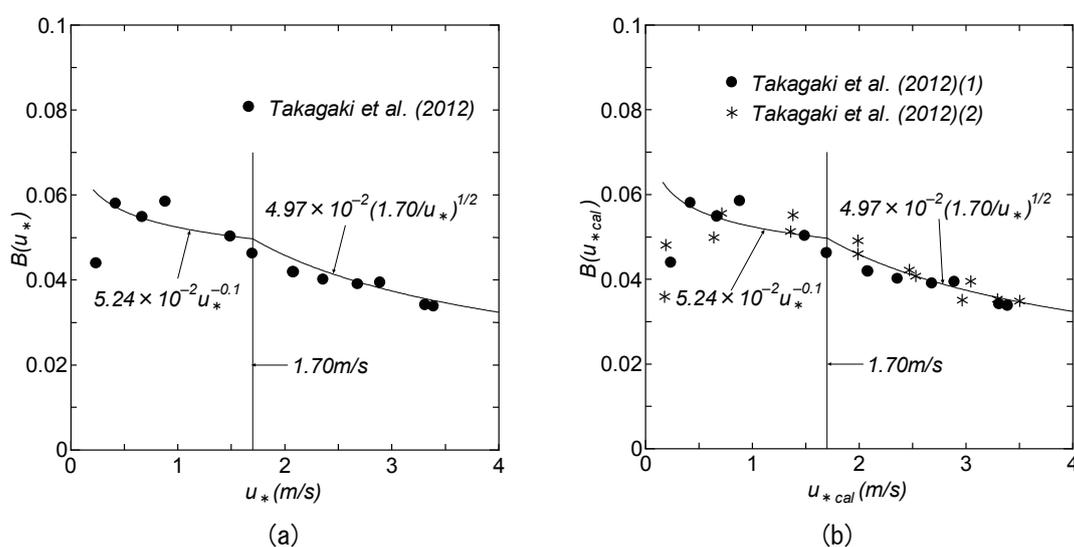


Fig. 4 (a) Comparison between Toba coefficient $B(u_*)$ - u_* relations based on both empirical equation and experiments by Takagaki et al.^[3], and (b) comparison between $B(u_{*cal})$ - u_{*cal} relations based on both empirical equation and experiments by Takagaki et al.^[3] in cases where u_{*cal} is estimated by Takagaki et al.^[3] equation.

区別は後出の Fig. 8 でも同じである。Takagaki ら^[3]の実験値は付録 E に与える。添字を除いて記述すれば、いずれの図でも u_* の最も小さい値に対する B を除いて、 B の観測値は B の経験曲線と比較的よく符合し、限界風速 $u_{*c} = 1.70$ m/s を境とする B の挙動がよく理解できる。 B の経験曲線は実験値の平均的挙動を表す式に基づいて求められているので、この有意な対応はある程度予想されよう。

Fig. 5 は鈴木・鳥羽^[10]によって収集された既往の実験・観測結果に基づいて作成した gH_s/u_*^2 と gT_s/u_* の関係を示し、両者は式(25)の Toba^[5]の $3/2$ 乗則によってよく表示される。この場合、Toba 係数 B の平均値 B_m と標準偏差 B_σ および B の最小値と最大値は $B_m \pm B_\sigma = 0.062 \pm 0.009$, $B_{min} = 0.038$, $B_{max} = 0.080$ であり、平均値 $B_m = 0.062$ は原式による Toba 定数 ($B_T = 0.062$) と一致する。多くの資料値は図中に示した $B_m \pm B_\sigma$ に対応する直線の範囲内に、また全部の資料値は B_{max} と B_{min} に対応する直線の範囲内に納まる。一方、式(22) ($u_* < 1.70$ m/s) における Toba 係数 B は Table 2 でみるように、Toba 定数 $B_T (= 0.062)$ と比べて $u_* < 0.186 (\approx 0.19)$ m/s で大きく、 $u_* > 0.19$ m/s で小さいことから、ここでの実験・観測結果に基づく Toba 係数より平均的に 0.006 程度小さいようである。

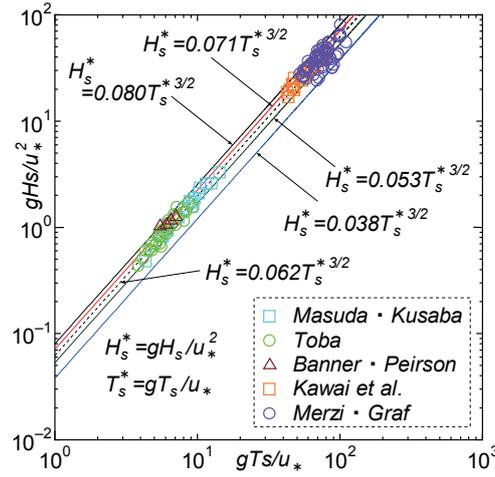


Fig. 5 Relation between gH_s/u_*^2 and gT_s/u_* based on experiments and in-situ observations.

Fig. 6 のうち (a)は既往の実験・観測結果に基づいて得た Toba 係数 B と u_* の関係を示す。図中には Takagaki ら^[3]に基づく式(22)の Toba 係数 $B = 5.24 \times 10^{-2}u_*^{-0.1}$ と Toba^[5]による式(25)の Toba 定数 $B_T = 0.062$ を与える。Merzi · Graf (1985) や Kawai et al. (1977) の現地観測資料に基づく B の値のばらつきはとくに前者の場合に大きく、実験資料に基づく B 値のばらつきは相対的に小さい。実験・観測資料に基づく Toba 係数 B は全体として Toba^[5]による一定値というよりも Takagaki ら^[3]の B のように、 u_* とともにわずかに減少するようにみえるが、Takagaki ら^[3]の係数 B よりやや大きい値を与える。Fig. 6 のうち (b)は u_* に代えて H_s と T_s の観測値を与えた式(5)と式(1)から計算される u_{*cal} を用いた場合の Toba 係数 B_{cal} と u_{*cal} の関係を表す。因みに、 B_{cal} の平均値と標準偏差は $B_{calm} \pm B_{cal\sigma} = 0.063 \pm 0.008$ 、最小値と最大値は $B_{calmin} = 0.042$ および $B_{calmax} = 0.078$ であるから、 u_* を実験・観測値に基づく数値とかなりよく符合する。しかし、Fig. 6 (a)と比べると、標準偏差の値 ($B_\sigma = 0.009$, $B_{cal\sigma} = 0.008$) が示唆するように、 B_{cal} のばらつきがやや小さい。ここで実験値に限れば、 u_* に基づく B の平均値と標準偏差は

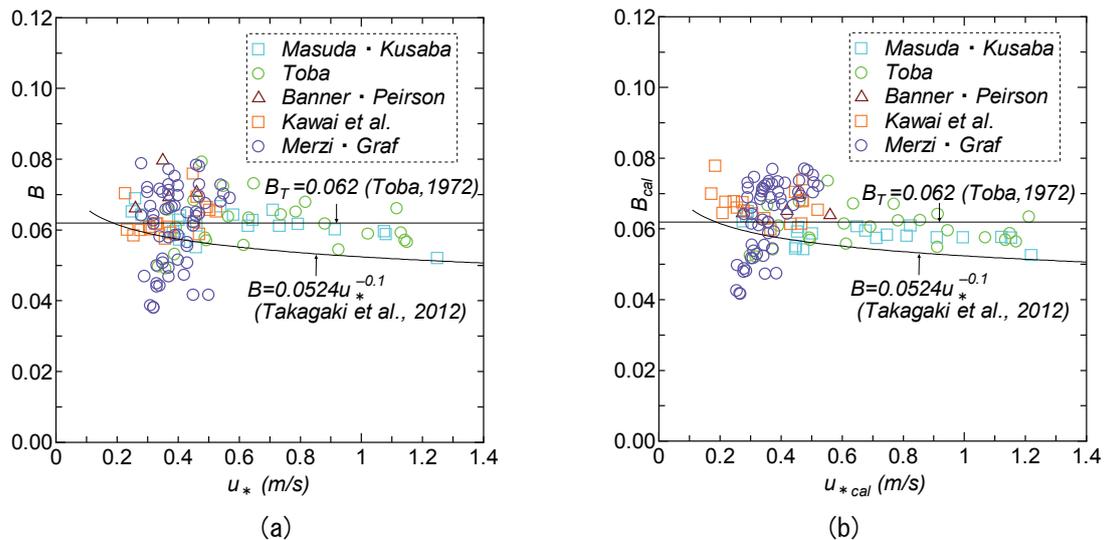


Fig. 6 (a)Relation between Toba coefficient B and u_* based on experiments and in-situ observations, and (b)relation between B_{cal} and u_{*cal} , in cases where estimation of u_{*cal} is based on Takagaki et al.^[3] equation.

$B_m \pm B_\sigma = 0.0624 \pm 0.0065$, u_{*cal} に基づく場合には $B_{calm} \pm B_{cal\sigma} = 0.0601 \pm 0.0047$ をとり, u_* の場合の値が両者とも大きい。一方, 観測値の場合には $B_m \pm B_\sigma = 0.0615 \pm 0.0102$, $B_{calm} \pm B_{cal\sigma} = 0.0642 \pm 0.0091$ を与え, 平均値については u_{*cal} の場合にかなり大きい。これは Kawai et al.による観測値の場合に, $B_m \pm B_\sigma = 0.0630 \pm 0.0047$, $B_{calm} \pm B_{cal\sigma} = 0.0667 \pm 0.0043$ を与える特性によるところが大きい。

要するに, 実験・観測値の全資料に基づく場合, Toba 係数 B の各種統計量 (m , σ , \min , \max) に及ぼす u_* 評価法の影響はほとんどみられないが, 実験値単独資料, 観測値単独資料と対象資料を細分化 (分割) すると, Fig. 6 (a) と (b) から明らかなように, u_* 評価法の影響が多少現れる。しかし, その程度はあまり有意でないし, Fig. 3 (b) でみたように, Takagaki ら^[3]の u_* 推定法の精度もある程度以上保障されていることから, 3. の解析においても Takagaki ら^[3]の u_* 推定法は適用可能と考えられる。

Fig. 7 は gH_s/u_{*cal}^2 と gT_s/u_{*cal} の関係および B と B_{cal} の関係を示す。(a)によれば実験・観測値の挙動は Toba 係数 B を原式の Toba 定数 $B_T = 0.062$ よりごくわずかに大きい $B_{cal} = 0.063(0.0626)$ とする $3/2$ 乗則によってよく表示される。また (b) では, B と B_{cal} の計算においてそれぞれ同じ H_s と T_s を用いていることから, (b)は u_* と u_{*cal} の関係を示した Fig. 3 (b)と同じ比較の意味をもつ。すなわち, B と B_{cal} は u_* と u_{*cal} との関係と同程度によく符合する。これは (a) と Fig. 5 の場合にも同様である。

Table 3 は実験・観測資料 (exp-obs) に基づく u_* に加えて, Wu^[6], Mitsuyasu・Kusaba^[7], Takagaki ら^[3]および Iwano ら^[4]による 6 種類の C_d 式に基づく u_{*cal} を用いた場合の Toba 係数 B_{cal} の統計値の一覧を示す。上述したように, Takagaki ら^[3]の C_d 式(8) (Taka1) に基づく Toba 係数 B_{cal} の平均値 B_{calm} と標準偏差 $B_{cal\sigma}$ は実験・観測資料より得た値とそれぞれほぼ符合するのに対して, 他の C_d 式では平均値 B_{calm} , 標準偏差 $B_{cal\sigma}$ ともに Takagaki ら^[3] (Taka2), Wu^[6], Iwano^[4], Mitsuyasu・Kusaba^[7] (MK1, MK2) の順に大きくなり, 実験・観測資料より得た値から離れる。したがって, 6 種類の C_d 式の中では Takagaki ら^[3]の C_d 式(8) (Taka1) の適用性がより高いと言えよう。このことから, 3. における観測資料に対する解析では, Takagaki ら^[3]の C_d 式(8) (Taka1) の使用がより有用な結果を与えると推測される。

以上の関係を既往の研究成果でみると, Mitsuyasu^[11]は無次元波高 gH_s/u_*^2 や無次元ピーク周波数 u_*f_p/g と無次元吹送距離 $F_*(= gF/u_*^2)$ の関係を次式で与えている。

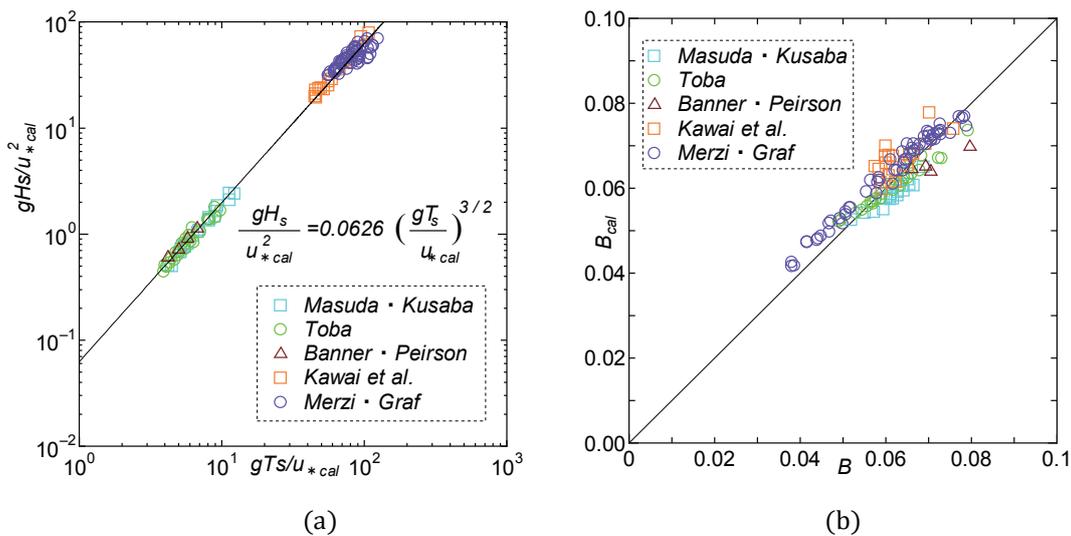


Fig. 7 (a) Relation between gH_s/u_{*cal}^2 and gT_s/u_{*cal} , in cases where u_{*cal} is used for u_* , and (b) relation between u_* -based Toba coefficient B and u_{*cal} -based Toba coefficient B_{cal} .

Table 3 Mean, standard deviation, minimum and maximum of either C_d law-based Toba coefficient B_{cal} or measured u_* -based Toba coefficient B (experiments and in-situ observations case).

C_d form.	B_{cal}			
	B_{calm}	$B_{cal\sigma}$	B_{calmin}	B_{calmax}
Wu	0.0648	0.0102	0.0392	0.0840
MK1	0.0675	0.0106	0.0411	0.0878
MK2	0.0681	0.0108	0.0418	0.0886
Taka1	0.0626	0.0080	0.0416	0.0777
Taka2	0.0645	0.0100	0.0388	0.0834
Iwano	0.0657	0.0103	0.0397	0.0856
exp-obs	0.0619	0.0090	0.0380	0.0797

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 5.24 \times 10^{-2} F_*^{0.504} \quad (27)$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = 1.00 F_*^{0.330} \quad (28)$$

したがって、 $T_p = 1.05T_s$ とすれば、式(27)と式(28)は

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 5.64 \times 10^{-2} F_*^{0.009} \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{3/2} ; F_* \approx 1.6 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6 \quad (29)$$

になる。ここで、 F_* の範囲は光易^[8]に掲載された $U_{10}f_p/g$ の限界値に対する記述に基づいて求めた \bar{F} の値を $C_d = 1.6 \times 10^{-3}$ として F_* に換算して得ている。式(29)によれば、Toba 係数 B は無次元吹送距離 F_* へのごく弱い依存性を残し、 $F_*^{0.009}$ は $F_* = 10^4$ で1.086、 $F_* = 10^5$ で1.109、 $F_* = 10^6$ で1.132、 $F_* = 10^7$ で1.156をとる。すなわち、Mitsuyasu^[11]の結果においてはToba 係数は F_* とともに若干増加する。この場合 $F_* = 3.70 \times 10^4$ でToba 定数 $B_T = 0.062$ に一致する。また、 F_* の増大が u_* の減少(F は一定)によるとすれば、式(29)および式(22)におけるToba 係数の増加は定性的に整合するが、 u_* を一定とした F の増加による F_* の増加の場合には式(22)によるToba 係数が吹送距離をパラメータとして含まないことから、両式は比較できなくなる。

ついで、 U_{10} による表示式をみると、まずTakagakiら^[3]による式(10)および式(9)から次式が求められる。

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = \begin{cases} 1.12 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 1.12 \times 10^{-2} \left(\frac{33.6}{U_{10}} \right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2} ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (30)$$

式(30)の第1式 ($U_{10} < 33.6 \text{ m/s}$) ではToba 係数 B_{10} は定数($=1.12 \times 10^{-2}$)をとるが、第2式 ($U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s}$) では U_{10} に強く依存する。

ここで上記と同様に、実験から得られる Ef_p^3/g を δ とすると、実験結果からToba 係数 B_{10} を求めるための式は式(19)よりつぎのようになる。

$$\left(\frac{gH_s}{U_{10}^2} \right) \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{-3/2} = B_{10} = \left(\frac{18.522\delta}{U_{10}} \right)^{1/2} \quad (31)$$

Fig. 8 は付録 E に与える Takagaki ら^[3]の実験結果から得た B_{10} と式(30)におけるToba 係数

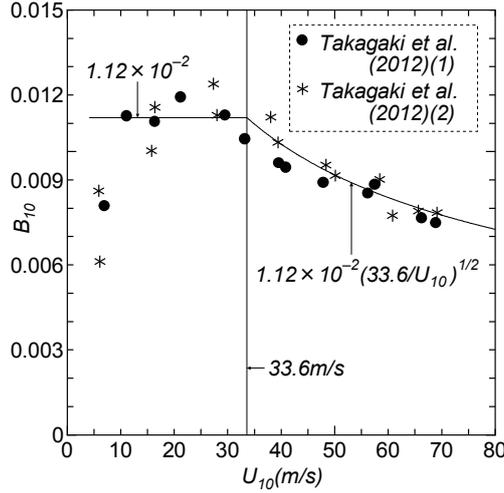


Fig. 8 Comparison between Toba coefficient B_{10} - U_{10} relations based on both empirical equation and experiments by Takagaki et al.^[3].

$B_{10}(= 1.12 \times 10^{-2} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s}, = 1.12 \times 10^{-2} (33.6/U_{10})^{1/2} ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s})$ を比較したものである。実験結果に基づく B_{10} の U_{10} に伴う変化傾向は $U_{10} < 8 \text{ m/s}$ 以下の3ケースを除けば、経験式によってよく近似されており、限界風速値 $U_{10c}(= 33.6 \text{ m/s})$ を越える超強風速域で B_{10} が U_{10} とともに減少する特性が明らかになる。ただし、 u_* 表示の場合に述べたように、経験式の作成には同じ実験値を用いているので、実験値と経験式の平均的に良好な対応は当然のことであろうし、また実験値に対する経験式の表示法の適切さを表すものとも考えられよう。

一方、Mitsuyasu^[14]による式(29)において Mitsuyasu・Kusaba^[7]による U_{10} のベキ乗型 C_d 式(16)を適用すれば、次式が得られる

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.771 \times 10^{-2} \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.009} U_{10}^{0.158} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2} ; \frac{gF}{U_{10}^2} \approx 25 \sim 3,200 \quad (32)$$

ただし、式(32)の $\tilde{F} = gF/U_{10}^2$ に対する各限界値は光易^[8]の $U_{10}f_p/g$ の限界値に対する記述(0.2~1.0)と次に述べる式(33)を参照して決めている。式(32)によれば、 U_{10} 表示のToba係数 B_{10} は式(30)の第1式($U_{10} < 33.6 \text{ m/s}$)におけるような定数でなく、 \tilde{F} と U_{10} の両者に依存する。

Table 4は式(32)に基づくToba係数 $B_{10}(\times 10^2)$ を U_{10} と \tilde{F} の各組合わせに対して与える。この場合、 B_{10} は U_{10} と \tilde{F} の増加に対して30%程度の増加を示す。しかし、式(27)のベキ数を0.504から1/2へ、式(28)のベキ数を0.330から1/3と近似したのち、 $C_d = 1.60 \times 10^{-3}$ として求められた2つの式(光易^[8])

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 2.10 \times 10^{-3} \tilde{F}^{1/2}, \quad \frac{gT_s}{U_{10}} = 0.326 \tilde{F}^{1/3} \quad (33)$$

を用いれば、次式が得られる。

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 1.13 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2} ; \frac{gF}{U_{10}^2} \approx 25 \sim 3,200 \quad (34)$$

式(34)におけるToba係数 B_{10} は一定値 1.13×10^{-2} をとり、もはや \tilde{F} と U_{10} に依存しない。これはむしろ、 \tilde{F} と U_{10} への依存性を除去するために式(27)と式(28)におけるベキ数を変更していることによる。また、この値はTakagakiら^[3]に基づく式(30)第1式の中の係数 1.12×10^{-2} に非常に近い。

さらに、SMB法で用いられるWilson^[9]のIV型式

Table 4 Change of Toba coefficient $B_{10} \times 10^2$ based on both Mitsuyasu^[11] equation and Mitsuyasu · Kusaba^[7] C_d law with increase of either wind velocity U_{10} or dimensionless fetch \tilde{F} .

\tilde{F}	U_{10} (m/s)						
	10	15	20	25	30	33.6	35
10	1.13	1.21	1.26	1.31	1.35	1.37	1.38
10^2	1.16	1.23	1.29	1.34	1.38	1.40	1.41
10^3	1.18	1.26	1.32	1.36	1.40	1.43	1.44
10^4	1.21	1.28	1.34	1.39	1.43	1.46	1.47

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.30 \left\{ 1 - (1 + 0.004\tilde{F}^{1/2})^{-2} \right\}, \quad \frac{gT_s}{U_{10}} = 8.61 \left\{ 1 - (1 + 0.008\tilde{F}^{1/3})^{-5} \right\} \quad (35)$$

において適用範囲を $\tilde{F}(=gF/U_{10}^2) < 10^3 \sim 10^4$ (光易^[8]) とすると、つぎの近似式が求められる。

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 1.19 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2}; \quad \frac{gF}{U_{10}^2} < 10^3 \sim 10^4 \quad (36)$$

ただし、式(35)の各近似式(式(33)で係数をそれぞれ 2.40×10^{-3} , 0.344 に変えたもの)の誤差は \tilde{F} とともに単調増大 ($\tilde{F} = 10^2$ で 6.0% と 11.3% , $\tilde{F} = 10^3$ で 19.3% と 25.1%) するが、両者から得られる式(36)の誤差は相殺効果により $\tilde{F} = 10^3 \sim 10^9$ に対して最大で -16.9% ($\tilde{F} = 10^2$ で -9.7% , $\tilde{F} = 10^3$ で -14.7% , $\tilde{F} = 10^4$ で -16.9%) である。同様に、Wilson^[9]のIV型式(35)を用いて数値計算により $\tilde{F} = 10^3 \sim 10^9$ の範囲で得た gH_s/U_{10}^2 と gT_s/U_{10} の資料値に $3/2$ 乗則をあてはめた場合、

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 1.26 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2}; \quad \tilde{F} = 10^3 \sim 10^9 \quad (37)$$

が得られる。式(37)の係数は実験・観測値から得られた Toba 係数 B_{10} の平均値とほぼ一致する。なお、後出の Fig. 11 に示すように、式(37)右辺の係数値に相当する資料値は $1.19 \times 10^{-2} \sim 1.43 \times 10^{-2}$ の値をとる。Fig. 9 は実験・観測資料より得た Toba 係数 B_{10} と U_{10} の関係を示す。図にはその平均値 $B_{10m} = 1.27 \times 10^{-2}$ および Takagaki ら^[3]に基づく式(30)第1式の中の係数 1.12×10^{-2} をそれぞれ横軸との平行線として与える。各資料値のばらつきはかなり大きい、その平均値は Takagaki ら^[3]に基づく式(30)

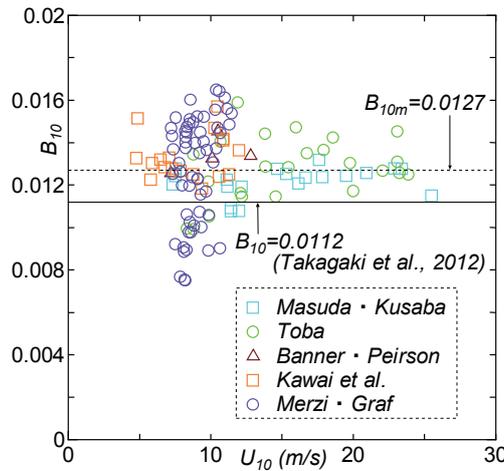


Fig. 9 Relation between Toba coefficient B_{10} and U_{10} based on experiments and in-situ observations.

第 1 式の中の 1.12×10^{-2} や光易^[8]による式(34)中の 1.13×10^{-2} や $\tilde{F} < 10^3 \sim 10^4$ に対する Wilson^[9]のIV型式(35)に基づく近似式(36)の中の 1.19×10^{-2} より大きく、上述のように Wilson^[9]のIV型式(35)から得た式(37)の係数 1.26×10^{-2} にほぼ一致する。

Fig. 10 は実験・観測値および Wilson^[9]のIV型式(35)に基づく gH_s/U_{10}^2 と gT_s/U_{10} の関係およびそれぞれの回帰直線 (両対数紙上, 回帰係数すなわち Toba 係数 B_{10} は前者で 1.27×10^{-2} , 後方で 1.26×10^{-2}) を表し、いずれの資料値もほぼ回帰直線でよく近似される。ただし、Wilson^[9]のIV型式(35)による資料値は gT_s/U_{10} が小さい場合と大きい場合に、それぞれ回帰直線より若干下側および上側にプロットされる。前者の傾向は式(36)における係数 1.19×10^{-2} が式(37)における係数 1.26×10^{-2} より小さい点に現れている。なお、実験・観測値として与えられた U_{10} は u_* と C_d から求められた U_{10cal} と一致する。

Fig. 11 は Wilson^[9]のIV型式(35)より得た $(gH_s/U_{10}^2)(gT_s/U_{10})^{-3/2}$ あるいは後出の Ef_p^3/gU_{10} と $\tilde{F} = gF/U_{10}^2$ の関係を示す。 $(gH_s/U_{10}^2)(gT_s/U_{10})^{-3/2}$ (=Toba 係数 B_{10}) は $\tilde{F} \rightarrow 0$ と $\tilde{F} \rightarrow \infty$ の両極限で最小値 1.19×10^{-2} に漸近し、 $\tilde{F} = 10^4$ でほぼ最大値 1.43×10^{-2} をとる。すなわち、 $1.43 \times 10^{-2}/1.19 \times 10^{-2} =$

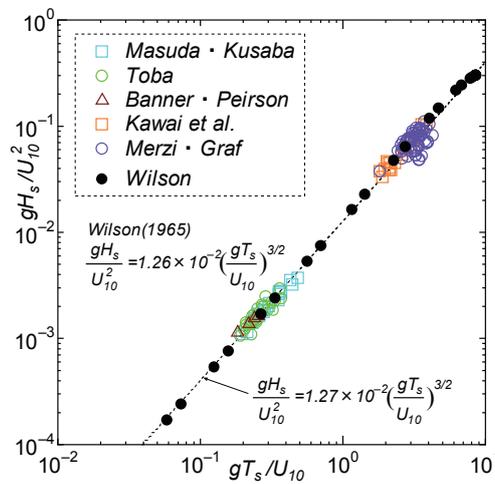


Fig. 10 Relation between gH_s/U_{10}^2 and gT_s/U_{10} based on either experiments and in-situ observations or Wilson^[9] type-IV equation.

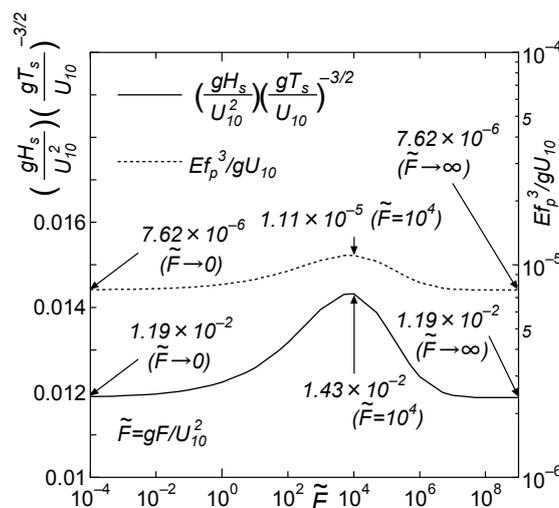


Fig. 11 Relation between $(gH_s/U_{10}^2)(gT_s/U_{10})^{-3/2}$ and gF/U_{10}^2 , and relation between Ef_p^3/gU_{10} and gF/U_{10}^2 (Wilson^[9] type-IV equation).

1.20であるから、最小値を基準にとると、Toba 係数 B_{10} は 20 %の変動を含む。また、式(37)における $B_{10} = 1.26 \times 10^{-2}$ を基準にとると、負側に-5.6 %、正側に 13.5 %の変動を伴う。

続いて光易^[8]による式(3.12)と式(3.13)、すなわち

$$\frac{gE^{1/2}}{U_{10}^2} = 5.24 \times 10^{-4} \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \quad (38)$$

$$\frac{U_{10}f_p}{g} = 2.92 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{-1/3} \quad (39)$$

から $gF/U_{10}^2 (= \bar{F})$ を消去することにより、

$$\frac{Ef_p^3}{gU_{10}} = 6.84 \times 10^{-6} ; \bar{F} \approx 25 \sim 3,200 \quad (40)$$

が得られている。これは局所平衡則と呼ばれ、無次元ピーク周波数 $U_{10}f_p/g = 0.2 \sim 1.0 (\bar{F} = 25 \sim 3,200)$ の範囲で成立するとされる。一方、Takagaki ら^[3]では、式(10)および式(9)がこれに相当する。

$$\frac{Ef_p^3}{gU_{10}} = \begin{cases} 6.75 \times 10^{-6} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 6.75 \times 10^{-6} \left(\frac{33.6}{U_{10}} \right) ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (41)$$

式(40)と式(41)第 1 式の成立条件に相違があるものの、その右辺の数値はほぼ対応する。しかし上でみたように、光易^[8]の式では gF/u_*^2 あるいは gF/U_{10}^2 と U_{10} への依存性、Takagaki ら^[3]の式では u_* あるいは U_{10} への依存性がみられる。すなわち Mitsuyasu^[11]による式(27)と式(28)から

$$\frac{Ef_p^3}{gu_*} = 1.72 \times 10^{-4} F_*^{0.018} ; F_* \approx 1.6 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^6 \quad (42)$$

となり、Mitsuyasu・Kusaba^[7]による U_{10} のベキ乗型 C_d 式(16)を適用すれば、式(42)から

$$\frac{Ef_p^3}{gU_{10}} = 3.22 \times 10^{-6} \bar{F}^{0.018} U_{10}^{0.315} ; \bar{F} \approx 25 \sim 3,200 \quad (43)$$

が得られる。また、Takagaki ら^[3]の式(41)と式(18)および式(17)から

$$\frac{Ef_p^3}{gu_*} = \begin{cases} \frac{1.49 \times 10^{-4}}{u_*^{0.2}} ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 1.335 \times 10^{-4} \left(\frac{1.70}{u_*} \right) ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (44)$$

が求められる。 Ef_p^3/gu_* は Mitsuyasu^[11]の式(42)では F_* へのごく弱い依存性、Takagaki ら^[3]の式(44)では u_* への弱い依存性 ($u_* < 1.70 \text{ m/s}$) と強い依存性 ($u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$) を示す。一方、 Ef_p^3/gU_{10} は Mitsuyasu^[11]の式(27)と式(28)を Mitsuyasu・Kusaba^[7]の式(16)により U_{10} 表示に変換した式(43)では \bar{F} への弱い依存性と U_{10} への有意な依存性を与える。

また Wilson^[9]のIV型式(35)で $\bar{F} \rightarrow 0$ (\bar{F} が十分に小さい)、 $\bar{F} \rightarrow \infty$ (\bar{F} が十分に大きい)の場合、それぞれ

$$\frac{Ef_p^3}{gU_{10}} = 7.62 \times 10^{-6} ; \bar{F} \rightarrow 0, \bar{F} \rightarrow \infty \quad (45)$$

になる。しかし \bar{F} の全領域($= 0 \sim \infty$)では、 Ef_p^3/gU_{10} は Fig. 11 に示したように、 7.62×10^{-6} から単調増大して $\bar{F} = 10^4$ でほぼ最大値 1.11×10^{-5} をとったのち、再び 7.62×10^{-6} に向けて単調減少する。変動幅は最小値からみて約 45 %である。 Ef_p^3/gU_{10} は $(gH_s/U_{10}^2)(gT_s/U_{10})^{-3/2}$ の 2 乗に相当することから、その変動は $(gH_s/U_{10}^2)(gT_s/U_{10})^{-3/2}$ に対する Toba 係数 B_{10} の場合の約 2 乗倍になっている。

要するに、式(42)～式(44)および Fig. 11 にみるように、局所平衡則における係数も定数でなく、Mitsuyasu^[11]に基づく式(42)と式(43)や Wilson^[9]のIV型式(35)に基づく Fig. 11 では、想定しうる F_* あるいは U_{10} と \bar{F} あるいは \bar{F} に対して数十%の変動、Takagaki ら^[3]に基づく式(44)の第 1 式では u_* の変動に対して 2 倍程度の変動を伴うこともあり得る。変動幅は Takagaki ら^[3]の式に基づく場合に大きい。

3. 内湾・内海における観測資料に基づく Toba 係数の検討

(1) 観測資料と解析方法

使用する海上風と波浪の観測資料は、a)局所風によって発達した風波が支配的である内湾・内海域の観測地点で得られた観測資料 (a-case), および b)内湾・内海波浪と外洋からの伝播波浪が共存する海域での観測資料 (b-case) からなる。ここでは前者 a)を主資料, 後者 b)を従資料として扱う。前者 a)の観測地点は東京湾では東京灯標, 千葉観測塔, 東京湾湾央地点, 第2海堡, 伊勢湾では湾口近くのブイ D, 湾内中部以北の中部国際空港鈴鹿 (MT) 局, 伊勢湾湾央地点 (近接する伊勢湾シーバースの海上風を使用), 瀬戸内海では東部海域の大阪湾にある MT 局, 大阪2地点, 神戸, 西部海域の周防灘西端の苅田, 別府湾の大分である。加えて, 閉鎖水域 (湖) における観測資料として, 霞ヶ浦湖心地点およびカナダとアメリカ合衆国にまたがる5大湖の1つである Erie 湖における3基のブイによる記録も用いる。観測資料の期間は霞ヶ浦湖心地点で1年間, ブイ地点で約1ヶ月 (秋季) と短い。そのため, とくにブイ地点における資料の数はきわめて少ない。Table 5 は 17 観測地点の諸元 (地点名, 資料期間, 後述する抽出条件を満たした資料の数 N , 風向・風速計高度 z m, 波高計設置水深 h m, $h/L_0 \geq 0.5$, $L_0 = 1.56T_{sc}^2$ とした深海波条件を満たす限界周期 T_{sc}) の一覧を与える。

一方, b)内湾・内海発生波浪と外洋からの波浪が共存する海域の観測地点は関東沿岸海域では平塚, 瀬戸内海では紀伊水道内の御坊沖, 沖ノ島南, 小松島および豊後水道北端の佐田岬先端地点である。観測地点の位置はそれぞれ参考文献^{[12]~[14]}に与えられる。

Table 5 A list of name, data period, number of selected data sample, anemometer height and water depth of gauges meter at each of measurement stations.

meas. station	period	N	z m	h m	T_{sc} s
Tokyo to-hyo	1983-2005	3,100	24	15	4.4
Chiba obs. tower	1994-2002	459	22	10	3.6
Tokyo wan-ou	1990-1996	2,884	10	27	5.9
Daini-kaiho	1991-2004	1,296	29	17	4.7
Ise Buoy D	1997-2000	621	5	35	6.7
Suzuka (MT) st.	2000-2003	568	19	8	3.2
Ise wan-ou	2002-2003	125	32	27	5.9
Osaka MT st.	1978-2005	10,216	17	21	5.2
Osaka (1)	1981-1988	330	13	11	3.8
Osaka (2)	1993-2005	2,451	13	13	4.1
Kobe	1983-2005	1,225	14	17	4.7
Kanda	1991-2005	531	11	9	3.4
Oita	1987-2005	4,585	16	14	4.2
Kasumi-koshin	1991	26	8	5.8	2.7
Lake Erie B45005	2000.10-11	8	5	15	4.4
Lake Erie B45132	2000.10-11	26	5	22	5.3
Lake Erie B45142	2000.10-11	5	5	27	5.9

Total of $N_t = 28,456$

内湾・内海における波浪観測資料が抱える最も大きな問題は、船舶の航行による ship waves の存在を含めて低波高時の波高および周期の観測精度の限界であり、とくに周期の観測精度は低波高時のみならず中規模以上の波高時にも疑問視されるケースが少なくない。そのため、波高および周期の観測資料に種々の制約条件を課して波高・周期観測資料の選択を行う。さらに、風向・風速計が設置されている構造物の影響を受ける風向条件では、海上風が適正に測定されているか否かの問題を有するが、ここではこの影響を無視して検討を進める。

使用する観測資料は海上高度 z m での 10 分間平均風速 U_z と風向 θ_w および有義波高 H_s と有義波周期 T_s であり、摩擦速度 u_* の資料は取得されていない。ここでは、 u_* および U_{10} の評価のために、Takagaki ら^[3]の方法を第 1 に用いる。すなわち、 $T_p = 1.05T_s (f_p = 1/T_p)$ として、 H_s と T_s を式(5)に与えて z_0 を求めたのち、式(1)に z , z_0 , U_z を与えて u_* を計算し、再度式(1)に $z = 10$ m, z_0 , u_* を与えて U_{10} を得る。また、10 m 高度風速 U_{10} の関数で表された C_d 式では、式(4)における U_{10} と U_z の関係を用いて U_z から U_{10} を、 C_d から u_* を求める。観測値 (obs) と計算値 (cal) を添字で区別して示すと、

$$\frac{gH_{sobs}}{u_{*cal}^2} = B_{cal} \left(\frac{gT_{sobs}}{u_{*cal}} \right)^{3/2}, \quad \frac{gH_{sobs}}{U_{10cal}^2} = B_{10cal} \left(\frac{gT_{sobs}}{U_{10cal}} \right)^{3/2} \quad (46)$$

によって、Toba 係数 B_{cal} および B_{10cal} (以下、'cal' を省略) を各資料ごとに得る。 B および B_{10} 資料について 2. と同様に平均値と標準偏差 ($B_m \pm B_\sigma$, $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$) および最小値 (B_{min} , B_{10min}) と最大値 (B_{max} , B_{10max}) を求める。

解析に使用する観測資料の抽出にあたっては、時刻 i における U_{10i} , H_{si} , T_{si} と時刻 $i-1$ における U_{10i-1} , H_{si-1} , T_{si-1} の各資料を用いて ① $(U_{10i} + U_{10i-1})/2 > 5$ m/s, ② $H_{si} \geq 0.4$ m, ③ $T_{si} \geq 3$ s, ④ $T_{si} < 10\sqrt{H_{si}}$, ⑤ $|(U_{si} - U_{si-1})/U_{si}| < 0.1$, ⑥ $|\theta_{wi} - \theta_{wi-1}| \leq 22.5^\circ$, ⑦ $|(H_{si} - H_{si-1})/H_{si}| < 0.1$, ⑧ $|(T_{si} - T_{si-1})/T_{si}| < 0.1$, ⑨ $T_{si} \leq T_{sc}$ が同時に生起する条件を課した。時刻 i と $i-1$ の時間差は観測時間間隔の 1 時間または 2 時間に相当する。条件 ① は中規模以上の風速条件、②, ③, ④ は観測精度を考慮した場合の内湾・内海発生波浪の抽出条件、⑤, ⑥, ⑦, ⑧ は風と波浪に関する定常性の条件、⑨ $h/L_0 \geq 0.5$ ($L_0 = 1.56T_{sc}^2$) の深海波条件にそれぞれ対応する。ただし、霞ヶ浦湖心地点における資料選択では波浪の規模と測得資料数を考慮して、② $H_{si} \geq 0.3$ m, ③ $T_{si} \geq 2.5$ s とするとともに、⑦, ⑧ の条件を課さない。

抽出条件に用いる 10 m 高度風速 U_{10} は C_d 式に依存しない値とするため、 U_z に対する 1/7 乗則の適用に基づく。また、① で用いる風速は波浪の発達を考慮して $i-1$ と i の 2 時刻における風速の平均値とする。2 時刻における平均値の使用という考え方は gH_s/u_*^2 や gT_s/u_* の評価における u_* についても同じであり、 u_{*i} と u_{*i-1} の平均値を u_* として用いた。なお、 $U_{10} > 33.6$ m/s をとる観測資料は全地点を通じてほぼ皆無であるので、観測資料を用いた $U_{10} > 33.6$ m/s の超強風速域における Takagaki ら^[3]や Iwano ら^[4]による式の検討は行えない。

(2) 結果の考察

Fig. 12 は a) 内湾・内海波浪ケースと b) 外洋波浪共存ケースについて $gH_{sobs}/u_{*cal}^2 (= H_s^*)$ と $gT_{sobs}/u_{*cal} (= T_s^*)$ の関係を上記の制約条件を課さない全資料について対数表示 (それぞれ $\log_{10}(H_s^*)$, $\log_{10}(T_s^*)$ と記す) で示す。図には Toba^[5]の 3/2 乗則の式(25)による直線も与える。以下では添字 'obs' と 'cal' を省略する。図によると、いずれのケースでも資料数はそれぞれ $N_T = 886,389$ 個と 437,050 個と膨大である。 gH_s/u_*^2 と gT_s/u_* は両対数紙上で直線に近い関係にあるが、3/2 乗則に基づく直線周辺の各資料値のばらつきが大きいという点に、各資料値の平均的な勾配もとくに b) 外洋波浪共存ケースでは 3/2 より大きい。純粋な風波以外の成分、たとえば発達中の風波の場合やうねりなどの成分が含まれる波浪の場合に勾配値が 2 近くをとりうるということが指摘されている (Ebuchi et al.^[15])。

Fig. 13 は上述の①～⑨の制約条件を課した場合の gH_s/u_*^2 と gT_s/u_* の関係を a), b) それぞれのケー

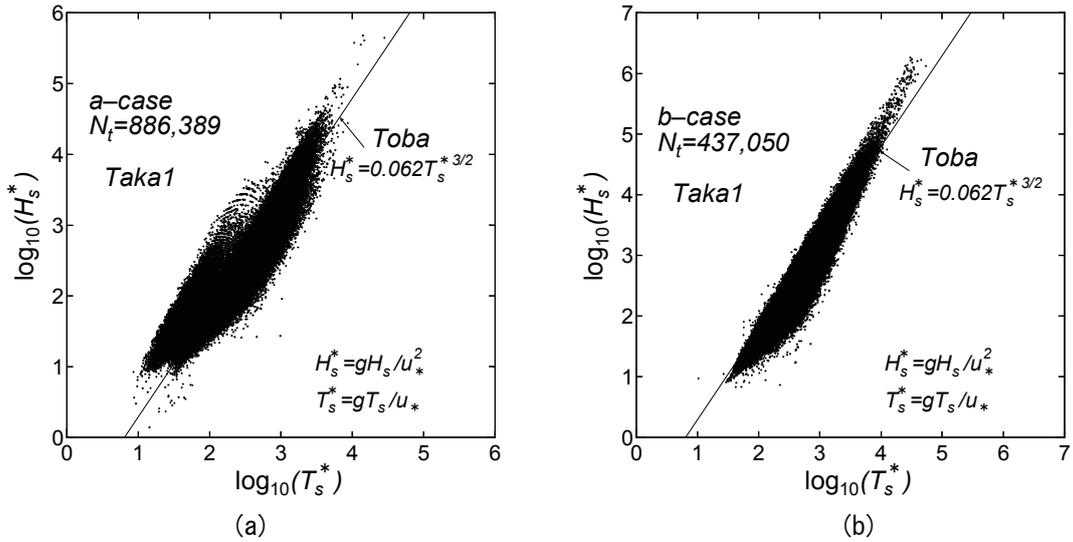


Fig. 12 Relation between $gH_{s\text{obs}}/u_{*cal}^2$ and $gT_{s\text{obs}}/u_{*cal}$ based on in-situ observations for (a) local wind waves case and for (b) local wind waves and swells co-existing case.

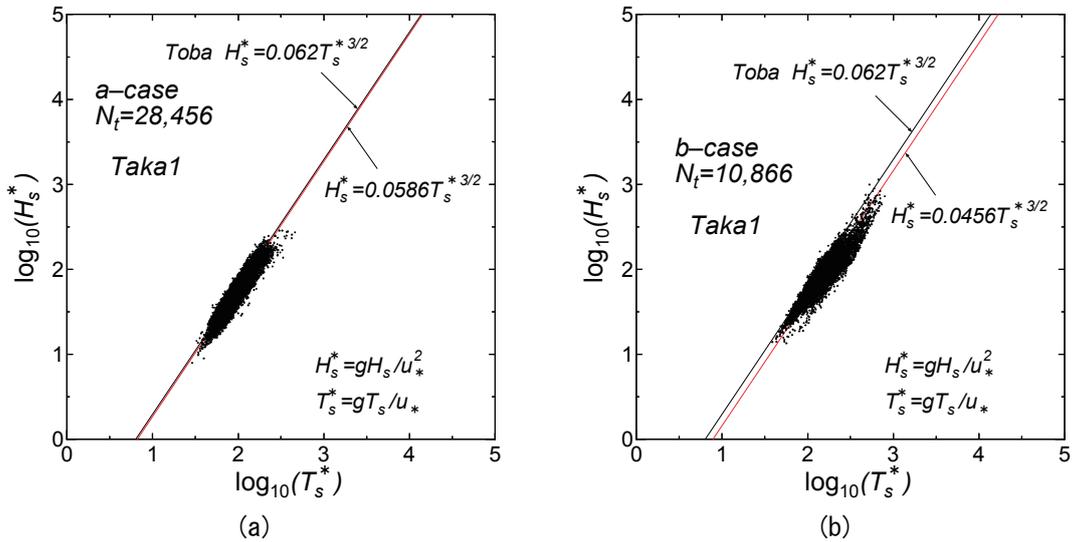


Fig. 13 Relation between gH_s/u_*^2 and gT_s/u_* based on in-situ observations satisfying selection conditions for (a) local wind waves case and for (b) local wind waves and swells co-existing case.

スについて示す。図中には係数の異なる $3/2$ 乗則に基づく直線を与える。いずれのケースでも各資料値の gT_s/u_* および gH_s/u_*^2 に関する存在範囲がかなり縮小するうえに、 $3/2$ 乗則を表す直線まわりの各資料値のばらつきも小さくなり、各資料値間の関係は $3/2$ 乗則で近似的に表される。a)の内湾・内海波浪ケースでは Toba 係数 B の平均値は $B_m = 0.0586$ で Toba 定数 $B_T = 0.062$ よりやや小さい程度であり、2つの直線の区別はあまりはっきりしない。b)の外洋波浪共存ケースでは Toba 係数 B の平均値は $B_m = 0.0456$ で Toba 定数 $B_T = 0.062$ の 74%程度になっているので、両直線の差が目立つ。外洋波浪と内湾・内海波浪が共存する状態では、 gH_s/u_*^2 と gT_s/u_* は $3/2$ 乗則にほぼ従うものの、Toba 係数 B は Toba 定数 $B_T = 0.062$ よりかなり小さい。これは外洋波浪がうねりとして係わっているのかもしれない。以下では、1例を除いて考察を a)内湾・内海波浪ケースに限定する。

Fig. 14 は抽出条件を満足した資料 ($N_t = 28,456$) から Takagaki ら^[3]の式に基づいて求めた Toba 係

数 B と摩擦速度 u_* の関係を示す。各資料値の B は0.02~0.09の間で広範囲に分布するが、 u_* の増加につれて資料の数が減少するとともに、変動範囲が狭くなる。

Table 6は資料数 N およびToba係数 B の平均値 B_m と標準偏差 B_σ 、最小値 B_{min} 、最大値 B_{max} を17地

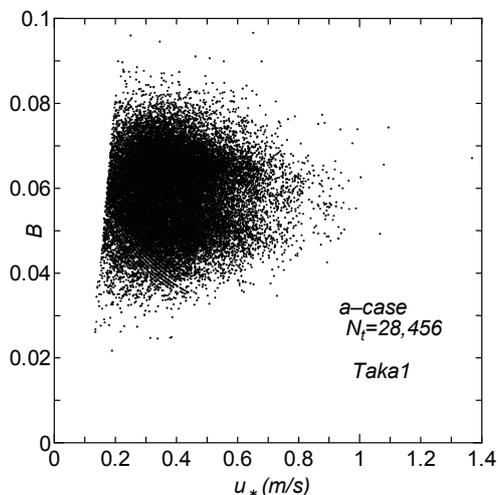


Fig. 14 Relation between Toba coefficient B and u_* based on in-situ observations satisfying selection conditions (local wind waves case).

Table 6 Mean, standard deviation, minimum and maximum of site-dependent Toba coefficient B and those of site-dependent Toba coefficient B_{10} (local wind waves case).

meas. station	N	B				B_{10}			
		B_m	B_σ	B_{min}	B_{max}	B_{10m}	$B_{10\sigma}$	B_{10min}	B_{10max}
Tokyo to-hyo	3,100	0.0517	0.0049	0.0337	0.0760	0.0101	0.0012	0.0059	0.0156
Chiba obs. tower	459	0.0644	0.0058	0.0527	0.0884	0.0130	0.0013	0.0099	0.0183
Tokyo wan-ou	2,884	0.0679	0.0067	0.0382	0.1029	0.0139	0.0018	0.0073	0.0246
Daini-kaiho	1,296	0.0488	0.0063	0.0321	0.0788	0.0092	0.0014	0.0057	0.0166
Ise Buoy D	621	0.0583	0.0100	0.0216	0.0863	0.0117	0.0025	0.0035	0.0183
Suzuka (MT) st.	568	0.0463	0.0054	0.0341	0.0612	0.0087	0.0012	0.0062	0.0121
Ise wan-ou	125	0.0529	0.0063	0.0348	0.0662	0.0103	0.0016	0.0060	0.0141
Osaka MT st.	10,216	0.0620	0.0068	0.0290	0.0898	0.0124	0.0017	0.0048	0.0182
Osaka (1)	330	0.0598	0.0070	0.0365	0.0753	0.0117	0.0017	0.0065	0.0161
Osaka (2)	2,451	0.0657	0.0074	0.0309	0.0896	0.0131	0.0018	0.0054	0.0183
Kobe	1,225	0.0513	0.0086	0.0245	0.0959	0.0097	0.0020	0.0041	0.0201
Kanda	531	0.0568	0.0052	0.0378	0.0716	0.0110	0.0012	0.0069	0.0149
Oita	4,585	0.0519	0.0079	0.0295	0.0802	0.0100	0.0018	0.0050	0.0161
Kasumi-koshin	26	0.0570	0.0070	0.0450	0.0727	0.0115	0.0018	0.0086	0.0158
Lake Erie B45005	8	0.0595	0.0071	0.0514	0.0703	0.0114	0.0014	0.0100	0.0138
Lake Erie B45132	26	0.0519	0.0048	0.0452	0.0610	0.0101	0.0010	0.0087	0.0122
Lake Erie B45142	5	0.0528	0.0051	0.0438	0.0596	0.0105	0.0013	0.0080	0.0122
all stations	$N_t = 28,456$	0.0586	0.0094	0.0216	0.1029	0.0116	0.0022	0.0035	0.0246

点別に与え、最終行に全資料についての値を示す。また、右半分の欄には後で述べる 10 m 高度風速 U_{10} を用いた場合の同様の統計量を掲載する。なお、これらの値は全期間の通年資料に基づいているが、季節ごとにみてもそれほど異ならない。これによれば、Toba 係数 B は平均値についても $0.0463 \sim 0.0679$ の範囲に分布し、地点ごとに相当の相違を示す。平均値が 0.050 以下の地点数は 2、 $0.050 \sim 0.055$ の地点数は 6、 $0.055 \sim 0.060$ の地点数は 5、 $0.060 \sim 0.065$ の地点数は 2、 $0.065 \sim 0.070$ の地点数は 2 であり、 0.060 以下の地点が 17 地点のうちで 13 地点と約 $3/4$ を占める。したがって、全体の平均値 $B_m = 0.0586$ は Toba 定数 $B_T = 0.062$ より小さくなるが、平均値が 0.062 以上をとる大阪 MT 局、東京湾湾央、大阪(2)における資料数 ($N = 10,216, 2,884, 2,451$) が全資料数 ($N_t = 28,456$) の約 55% とかなり多いので、全体の平均値 ($B_m = 0.0586$) は 11 地点でみられる各平均値より大きくなっている。

このように、適用する資料の抽出条件や摩擦速度の推定法を同一にしたにもかかわらず Toba 係数 B の平均値が観測地点ごとに異なるという特徴が、測定・解析条件などの物理的状況の相違によるものか、統計的な変動によるものかは明らかでない。なお、後藤ら^[16]および後藤ら^[17]は大阪 MT 局の観測資料を用いて $B = 0.067$ を得ているが、今回の結果では Toba 係数 B の平均値 B_m は 0.0620 をとる。これは観測資料の期間長や資料抽出条件の相違に加えて、後述するように u_* の評価に用いた C_d 式の相違によるところが大きい。

Fig. 15 は gH_s/u_*^2 と gT_s/u_* の関係を東京灯標 ($B_m = 0.0517$) と大阪 MT 局 ($B_m = 0.0620$) について示す。2 つの観測地点では Toba 係数の平均値 B_m が異なるが、資料値の $3/2$ 乗則を表す直線まわりのばらつきは、抽出条件を満たした全資料値を記載した Fig. 13(a)におけるばらつきと比べてそれぞれの地点ではるかに小さい。

Fig. 16 は地点別に得た Toba 係数 B の平均値 \pm 標準偏差 ($B_{sm} \pm B_{s\sigma}$) と地点平均摩擦速度 u_{*sm} を示すが、平均値 (○, △, *印) のみならず標準偏差 (平均値を中心とする上下の線) を含めてみても、両者の間にあまり系統的な関係は見出されない。

Fig. 17 は全資料について摩擦速度 u_* が 0.1 m/s より 0.1 m/s の区間ごとに求めた平均値 u_{*m} とその間に属する資料の Toba 係数の平均値 \pm 標準偏差 ($B_m \pm B_\sigma$) および Takagaki ら^[3]の式に基づいて得た式 (22) による Toba 係数 ($B = 5.24 \times 10^{-2} u_*^{-0.1}$; $u_* < 1.70 \text{ m/s}$) を与える。図中には小区間別資料数 N_1 を示す。 $u_{*m} < 0.65 \text{ m/s}$ では N_1 は有意な値をとるが、 $u_{*m} > 0.8 \text{ m/s}$ では 100 以下と少なくなる。資

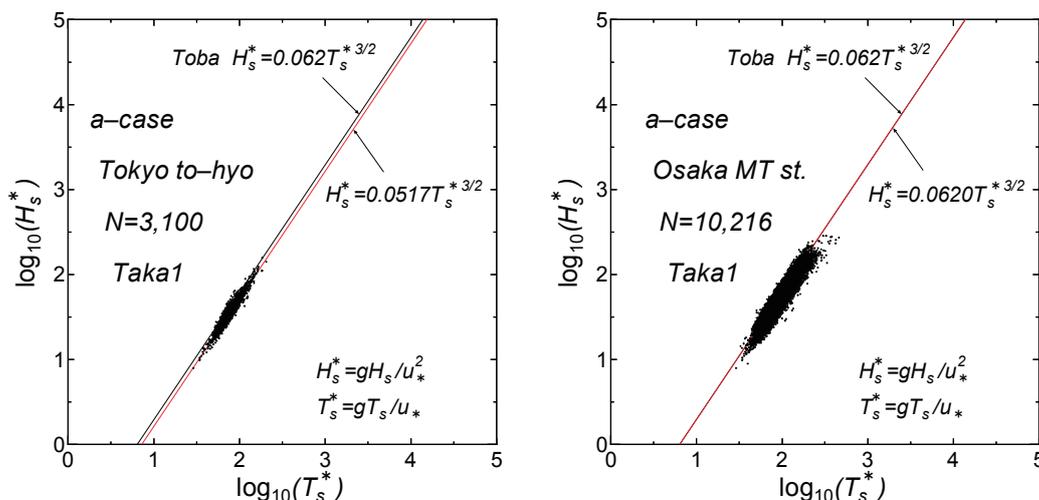


Fig. 15 Relation between gH_s/u_*^2 and gT_s/u_* based on in-situ observations satisfying selection conditions at either Tokyo to-hyo or Osaka Mt station (local wind waves case).

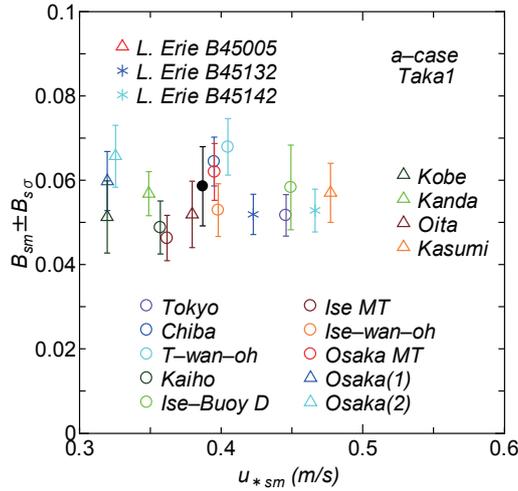


Fig. 16 Relation between mean and standard deviation $B_{sm} \pm B_{s\sigma}$ of Toba coefficient B based on site-dependent in-situ observations satisfying selection conditions and site-mean friction velocity u_{*sm} (local wind waves case).

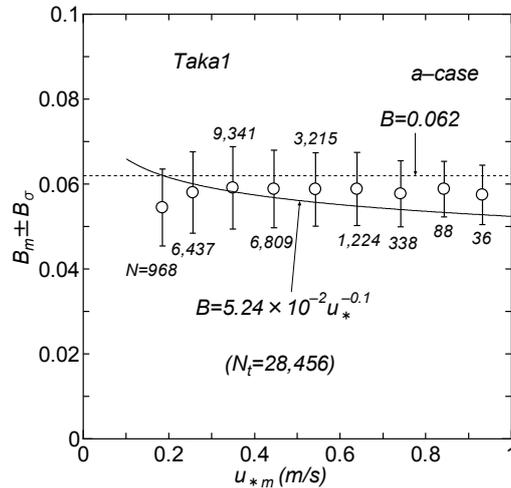


Fig. 17 Relation between mean and standard deviation $B_m \pm B_\sigma$ of Toba coefficient B based on u_{*m} segment-separated in-situ observations satisfying selection conditions and segment-mean friction velocity u_{*m} (local wind waves case).

料値に基づく結果では平均値 B_m は u_{*m} とともに若干増加したのち、ごく緩やかに減少するようにみえる。Takagaki ら^[3]の式(22)に基づく Toba 係数 B は u_{*} とともに緩やかに減少し、 u_{*m} がある程度以上では傾向を同じとするが、絶対値がやや小さい。

以下では摩擦速度 u_{*} のかわりに 10 m 高度風速 U_{10} を用いて解析した結果を述べる。Fig. 18 は抽出条件を満たした全資料について Toba 係数 B_{10} と 10 m 高度風速 U_{10} との関係を与える。制約条件の 1 つに最低風速 $U_{10} = 5$ m/s を用いているので、 $U_{10} < 5$ m/s の資料は存在しない。 B_{10} の資料値は 0.004~0.02 の広い範囲に分布するが、 U_{10} の増加とともに分布幅が縮小し、 $B_{10} \approx 0.01$ 付近に集まる。

Table 6 の右欄によれば、Toba 係数 B_{10} も平均値 B_{10m} について 0.0087~0.0139 に分布し、 u_{*} の場合と同様に地点間で有意な相違を与える。 B_{10m} の 0.001 区間別地点数は 0.010~0.011 で 7 と最も多いし、他の各区間で 2 あるいは 3 と少ない。しかし、 B_{10} の全地点平均値 $B_{10m} = 0.0116$ を与えるのは主として全資料数 ($N = 28,456$) の 1/3 強 ($N = 10,216$) を占める大阪 MT 局における B_{10} の寄与

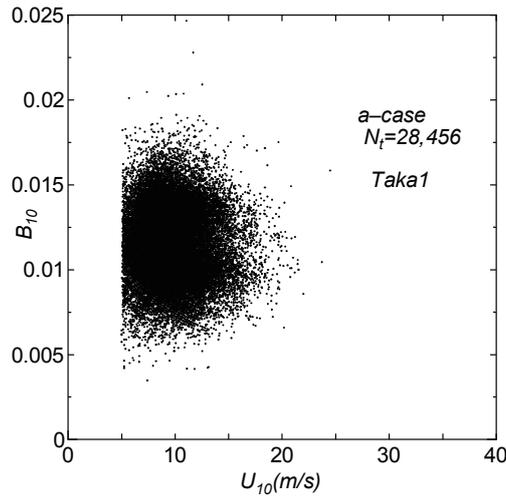


Fig. 18 Relation between Toba coefficient B_{10} and U_{10} based on in-situ observations satisfying selection conditions (local wind waves case).

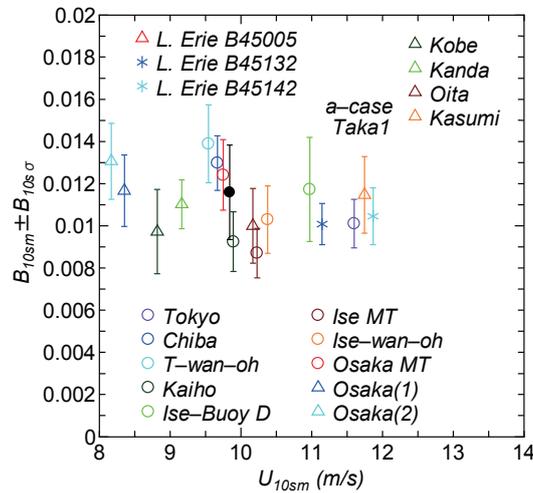


Fig. 19 Relation between mean and standard deviation $B_{10sm} \pm B_{10s\sigma}$ of Toba coefficient B_{10} based on site-dependent in-situ observations satisfying selection conditions and site-mean 10 m height wind velocity U_{10sm} (local wind waves case).

($B_{10m} = 0.0124$) が有意に働くためである。

Fig. 19 は地点別に得た Toba 係数 B_{10} の平均値 \pm 標準偏差 ($B_{10sm} \pm B_{10s\sigma}$) および 10 m 高度風速の平均値 U_{10sm} を示す。地点に対する記号は Fig. 16 におけるものと同じである。Toba 係数 B_{10sm} は U_{10sm} が大きい地点で小さい傾向を与えなくもないが、 $U_{10sm} < 11$ m/s では地点間で大きい変動を伴い、系統的な傾向を見出し難い。

Fig. 20 は 5 m/s より 1 m/s 区間で求めた U_{10} の平均値 U_{10m} およびこれに相当する区間に属する Toba 係数 B_{10} の平均値 \pm 標準偏差 ($B_{10m} \pm B_{10\sigma}$) と小区間別資料数 N を与える。図中には Takagaki ら[3]に基づく式(30)の係数 $B_{10} = 1.12 \times 10^{-2}$ ($U_{10} < 33.6$ m/s) を表す x 軸との平行線も示す。小区間別資料数 N は 487~4,409 と約 10 倍異なるが、最小数でも 487 であるから、少なくとも平均値の算出に対して有意な値と言えよう。 B_{10} の平均値 B_{10m} は 0.011~0.012 の範囲にあり、 U_{10m} とともに 8 m/s 区間まで増加して平均値 0.012 弱をとったのち、緩やかに減少する。これは区間別 u_{*m} で整理した Fig. 17 と同

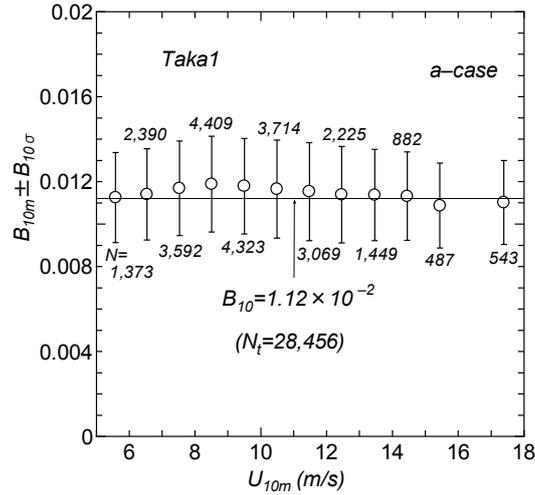


Fig. 20 Relation between mean and standard deviation $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$ of Toba coefficient B_{10} based on U_{10} segment-separated in-situ observations satisfying selection conditions and segment-mean 10 m height wind velocity U_{10m} (local wind waves case).

じ傾向であるが、Takagaki ら^[3]の式(30)における Toba 係数 ($B_{10} = 1.12 \times 10^{-2}$ の一定値) の挙動と整合しないし、全体の平均値でみても 0.004 程度小さい。また、Fig. 20 における B_{10m} は Mitsuyasu^[11]と Mitsuyasu・Kusaba^[7]に基づく結果より得た式(32)における Toba 係数 B_{10} (係数は \bar{F} のみならず U_{10} とともに緩やかに増加) と逆の挙動をとり、両者の傾向は一層整合しない。

Table 7 は Wu^[6], Mitsuyasu・Kusaba^[7], Takagaki ら^[3]および Iwano ら^[4]による 6 つの C_d 式を内湾・内海の観測資料に適用した場合に得た Toba 係数 B および B_{10} の各統計量 (添字は平均値 m , 標準偏差 σ , 最小値 min と最大値 max) の一覧を示す。Toba 係数 B は適用する C_d 式ごとに変わる。平均値で見れば、Takagaki ら^[3] (Taka1) による $B_m = 0.0586$ から Mitsuyasu・Kusaba^[7] のベキ乗型 C_d 式 (MK2) による $B_m = 0.0625$ の範囲 (差は約 0.004) で変わり、Mitsuyasu・Kusaba^[7] による MK1 と MK2 は Toba 定数 $B_T = 0.062$ と有効数字 2 桁まで一致する $B_m = 0.0620$ と 0.0625 を与える。因みに、MT 局では MK1 による Toba 係数は $B = 0.0663$ であるから、MK1 を用いた後藤ら^[16]や後藤ら^[17]による $B = 0.067$ にかなり近い。

Table 7 Mean, standard deviation, minimum and maximum of C_d law-dependent Toba coefficient B and those of C_d law-dependent Toba coefficient B_{10} (local wind waves case).

C_d form.	B				B_{10}			
	B_m	B_σ	B_{min}	B_{max}	B_{10m}	$B_{10\sigma}$	B_{10min}	B_{10max}
Wu	0.0596	0.0116	0.0181	0.1225	0.0116	0.0022	0.0034	0.0243
MK1	0.0620	0.0121	0.0189	0.1274	0.0116	0.0022	0.0034	0.0242
MK2	0.0625	0.0123	0.0193	0.1279	0.0116	0.0022	0.0034	0.0242
Taka1	0.0586	0.0094	0.0216	0.1029	0.0116	0.0022	0.0035	0.0246
Taka2	0.0592	0.0115	0.0179	0.1219	0.0116	0.0022	0.0034	0.0243
Iwano	0.0603	0.0118	0.0184	0.1236	0.0116	0.0022	0.0034	0.0243

$N_t = 28,456$

要するに、Taka1 (Ef_p^3/g 表示)を除く5種類の U_{10} 表示に基づく C_d 式のうち、 $U_{10} < 25$ m/sでより小さい C_d 値を与える Mitsuyasu・Kusaba^[7]のMK1とMK2がより大きい B_m を生じる。標準偏差 B_σ や最小値 B_{min} 、最大値 B_{max} の値は5種類の U_{10} 表示に基づく C_d 式によるものの間であまり差を示さない。6種類の C_d 式に基づく結果の間では、 B_{min} はTakagakiら^[3]のTaka1の場合に最も大きく、 B_{max} と B_σ は最も小さい。すなわち、標準偏差 B_σ についてはいずれの C_d 式でも平均値 B_m の20%程度であるが、Taka1では16%程度とやや小さい。

一方、10 m 高度風速 U_{10} を用いて得た Toba 係数 B_{10} の場合、平均値 B_{10m} 、標準偏差 $B_{10\sigma}$ 、最小値 B_{10min} と最大値 B_{10max} に関して各 C_d 式に基づく結果の数値にほとんど差を生じない。これは z m 高度風速 U_z から計算される摩擦速度 u_* には用いる C_d 式の間で差を生じるが、10 m 高度風速 U_{10} にはほとんど差を生じないことを意味する。

なお、参考までに Fig. 21 は Takagaki ら^[3]の式に基づく C_d と U_{10} の個々の値の関係、 $U_{10} = 5$ m/s から

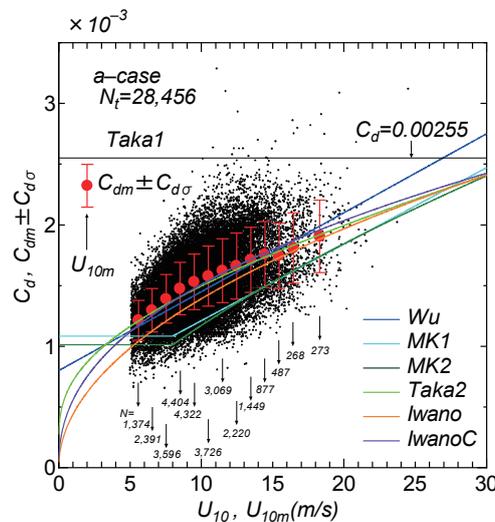


Fig. 21 Relation between C_d based on Takagaki et al.^[3] equation and U_{10} , and relation between wind velocity U_{10} segment-separated mean and standard deviation $C_{dm} \pm C_{d\sigma}$ of C_d based on in-situ observations satisfying selection conditions and segment-mean wind velocity U_{10m} , in addition to relation between C_d based on any of 5 U_{10} -dependent C_d formulae and U_{10} (local wind waves case).

Table 8 Mean, standard deviation, minimum and maximum of site-dependent Toba coefficient B and those of site-dependent Toba coefficient B_{10} (local wind waves and swells co-existing case).

meas. station	N	B				B ₁₀			
		B _m	B _σ	B _{min}	B _{max}	B _{10m}	B _{10σ}	B _{10min}	B _{10max}
Hiratsuka	3,939	0.0502	0.0093	0.0201	0.0961	0.0095	0.0021	0.0033	0.0205
Gobo	3,085	0.0412	0.0094	0.0178	0.0792	0.0077	0.0022	0.0028	0.0158
Komatsushima	820	0.0453	0.0085	0.0229	0.0666	0.0085	0.0020	0.0037	0.0139
Okinoshima	2,748	0.0435	0.0103	0.0172	0.0783	0.0081	0.0024	0.0027	0.0159
Sadamisaki	274	0.0501	0.0087	0.0301	0.0764	0.0095	0.0020	0.0051	0.0153
all stations	N _t = 10,866	0.0456	0.0103	0.0172	0.0961	0.0086	0.0023	0.0027	0.0205

1 m/s ごとの区間で求めた C_d の平均値 C_{dm} と標準偏差 $C_{d\sigma}$ および区間平均風速 U_{10m} と区間別資料数 N に加えて、5種類の U_{10} 表示による C_d 式 (Wu, MK1, MK2, Taka2, Iwano) に基づく C_d と U_{10} の関係を示す。 N は $U_{10} > 16$ m/s の区間で約 270 と相対的に少ない。図中には Takagaki ら^[3]の限界値 $C_d = 0.00255$ を示す横軸との平行線も与える。 C_d の値は大部分の資料値を含む $U_{10} < 15$ m/s では MK2, MK1, Iwano, Wu, Taka2 の順に大きくなり、Takagaki ら^[3]に基づく Taka1 (U_{10} 区間別の●印) はより大きい値を与える。この傾向はこれらの C_d 式に基づく B の値の特性と逆の対応をする。

最後に、b)外洋波浪共存ケースに対して得た Toba 係数 B および B_{10} それぞれの平均値 (B_m, B_{10m}), 標準偏差 ($B_\sigma, B_{10\sigma}$), 最小値 (B_{min}, B_{10min}), 最大値 (B_{max}, B_{10max}) の地点別一覧を Table 8 に示す。この場合の B の平均値は $B_m = 0.0456$, B_{10} の平均値は $B_{10m} = 0.0086$ であるから、a)内湾・内海波浪ケースにおけるそれぞれの値の 78 %および 74 %とかなり小さい。しかも平均値の変動範囲は $B = 0.0412 \sim 0.0502$, $B_{10} = 0.0077 \sim 0.0095$ と相対的に狭い。b)外洋波浪共存ケースにおける Toba 係数が a)内湾・内海波浪ケースにおける係数より小さい理由として、現象的にはうねりの存在があげられるが、その物理過程は現段階では明らかでない。

4. 結 語

本研究で得た結果はつぎのようである。

①Takagaki ら^[3]および Iwano ら^[4]により提案された結果では、海面抵抗係数 C_d 、波浪特性量 Ef_p^3/g 、粗度長 z_0 には 10 m 高度限界風速 $U_{10c} = 33.6$ m/s を境として、上限値 $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$, $Ef_p^3/g = 2.27 \times 10^{-4}$ m/s, $z_0 = 0.363$ cm が与えられる。これらの数値の妥当性は鈴木・鳥羽^[10]により収集された既往の実験・観測資料 ($U_{10} \leq 25.5$ m/s) において、それぞれの上限値を上まわる資料がほとんど存在しないという意味で一定程度確認される。また、粗度長 z_0 を base とする無次元波浪エネルギー \hat{E} と無次元ピーク周波数 f_p の関係および u_* に対する計算値と実験・観測値との対応についても Takagaki ら^[3]の結果の妥当性がある程度検証される。したがって、Takagaki ら^[3]の式(5)に基づく有義波高 H_s ・有義波周期 T_s からの粗度長 z_0 、対数則による C_d および z m 高度風速 U_z からの摩擦速度 u_* と 10 m 高度風速 U_{10} の適正な評価が可能になる。

②10 m 高度風速 $U_{10} < 33.6$ m/s で U_{10} の関数として表された Takagaki ら^[3] (Taka2) および Iwano ら^[4] (Iwano) による海面抵抗係数 C_d の値は低・中速度時 (< 25 m/s) には既往の Mitsuyasu・Kusaba^[7] (MK1, MK2) による値よりやや大きく、高風速時 (> 27.5 m/s) にはやや小さい。Wu^[9]による C_d は $U_{10} > 15$ m/s では、これらのうちで最も大きい値を与える。

③摩擦速度 u_* で表された Toba^[5]の 3/2 乗則における Toba 係数 B は、 Ef_p^3/g や C_d における上限値の存在を示唆した Takagaki ら^[3]と Iwano ら^[4]の結果では $u_* < 1.70$ m/s の場合定数でなく u_* に緩やかに ($\propto u_*^{-0.1}$), $u_* \geq 1.70$ m/s の場合 u_* に強く ($\propto u_*^{-1/2}$) 依存する。つまり、Toba 係数 B を定数とする Toba^[5]の 3/2 乗則は、 $u_* < 1.70$ m/s の場合には弱い意味で近似的に当てはまるが、 $u_* \geq 1.70$ m/s の超強風速時の場合にはもはや成立しない。Takagaki ら^[3]の実験結果 ($Ef_p^3/g, z_0, u_*, U_{10}$) に基づいて導出された Toba 係数 B および B_{10} のそれぞれ u_* および U_{10} への依存を表す経験式は、同じ実験結果に基づく個々の B および B_{10} の平均的挙動を適切に再現することが確認される。また Mitsuyasu^[11]の結果でも、Toba 係数は摩擦速度で表した無次元吹送距離へのごく弱い依存性 ($\propto F_*^{0.009}$) を与え、定数とは言えない。 $u_* < 1.70$ m/s の既往の実験・観測値でも、Toba 係数 B の u_* への弱い依存性が多少みられなくもないが、確定的なほどの変化を与えない。なお、今回の検討で使用した既存の実験・観測資料および内湾・内海における観測資料はほぼすべて $U_{10} < 33.6$ m/s ($u_* < 1.70$ m/s) で得られているので、超強風速域 ($U_{10} \geq 33.6$ m/s) における挙動は対象とならない。

④ u_* の測定値を含む既往の実験・観測資料 ($u_* < 1.70$ m/s) では Toba 係数の平均値 (B_m) は Toba 定

数 ($B_T = 0.062$) と符合するが、標準偏差が 0.009、したがって平均値±標準偏差は 0.053~0.071 と、かなりの変動幅をもつ。また、実験資料単独では $B_m = 0.062$ (0.0624)、観測資料単独では $B_m = 0.062$ (0.0615) と平均値 B_m に関する相互の差は小さい。一方、 u_* の評価を Takagaki ら³⁾の式による場合も実験・観測資料ではほぼ同じ数値、たとえば $B_m = 0.063$ を与える。しかし、実験資料単独では $B_m = 0.060$ (0.0601)、観測資料単独では $B_m = 0.064$ (0.0642) と両者の結果に多少の差が現れる。すなわち、 u_* 推定式の影響が資料の細分化によりやや顕在化する。また、上述の Takagaki ら³⁾の式を含む 6 種類の C_d 式をそれぞれ u_* の推定に用いる場合、Toba 係数の平均値 B_m は 0.063 (0.0626) ~ 0.068 (0.0681) の範囲をとり、 u_* の測定値を用いた場合の $B_m = 0.062$ より大きい。各 C_d 式のうちでは、Takagaki ら³⁾による式 (Taka1) が実験・観測資料に基づく Toba 係数 B に最も近い値を与え、Mitsuyasu・Kusaba⁷⁾の式 (MK1, MK2) が最も大きい値をとる。さらに、 u_* および B に対して、Takagaki ら³⁾による式 (Taka1) は実験値より観測値の場合に、逆に U_{10} 表示による各 C_d 式は観測値より実験値の場合にそれぞれよく符合することから、内湾・内海の観測資料に対しては Takagaki ら³⁾による式 (Taka1) の適用がより適切な結果を与えたと考えられる。

⑤ Takagaki ら³⁾ および Iwano ら⁴⁾ に基づく結果では、 U_{10} 表示の 3/2 乗則における Toba 係数 B_{10} は 1.12×10^{-2} ($U_{10} < 33.6$ m/s) であるが、Mitsuyasu¹¹⁾の風波の発達式と Mitsuyasu・Kusaba⁷⁾の C_d 式を組み合わせて得た 3/2 乗則の Toba 係数 B_{10} は U_{10} 表示の無次元吹送距離 ($\propto \bar{F}^{0.009}$) と風速 ($\propto U_{10}^{0.158}$) の関数で表され、とくに U_{10} とともに有意な増加を伴う。また、 U_{10} 表示の 3/2 乗則において Toba 係数 B_{10} が定数をとる場合、Mitsuyasu¹¹⁾の風波の発達式における F_* あるいは \bar{F} のべき数を調整したのち $C_d = 1.6 \times 10^{-3}$ とした光易⁸⁾の式では 1.13×10^{-2} 、Wilson⁹⁾の IV 型式を $\bar{F} < 10^3 \sim 10^4$ に対して近似した式では 1.19×10^{-2} 、Wilson⁹⁾の IV 型式では 1.26×10^{-2} となり、Toba 係数 B_{10} が用いる式ごとに変化する。既往の実験・観測結果では B_{10} の平均値は $B_{10m} = 1.27 \times 10^{-3}$ とほぼ Wilson⁹⁾の IV 型式に基づく結果が得られる。さらに 3/2 乗則を 2 乗した局所平衡則 $Ef_p^3/gu_* = \beta$ あるいは $Ef_p^3/gU_{10} = \beta_{10}$ においては、 β や β_{10} の変動はそれぞれ B や B_{10} の変動の 2 乗倍に拡大された形で現れる。

⑥ Wilson⁹⁾の IV 型式によれば、 U_{10} 表示の Toba 係数 B_{10} は \bar{F} の全範囲 ($0 \sim \infty$) に対して $1.19 \times 10^{-2} \sim 1.43 \times 10^{-2}$ をとり、20% の変動を含む。

⑦ 各種の制約条件を課して抽出した定常状態における内湾・内海の観測資料 ($U_{10} < 33.6$ m/s) を用いた Takagaki ら³⁾の式に基づく解析によれば、Toba 係数 B や B_{10} は平均値でみても、それぞれ $B_m = 0.0463 \sim 0.0679$ 、 $B_{10m} = 0.0087 \sim 0.0139$ と観測地点ごとにかかなりの変動を伴い、全体では平均値として $B_m = 0.0586$ 、 $B_{10m} = 0.0116$ を与える。前者は Toba 定数 ($B_T = 0.062$) より 0.0034 小さく、Takagaki ら³⁾の式 (22) に基づく値より全体としてやや大きい。後者は Wilson⁹⁾の IV 型式の近似式に基づく結果 ($B_{10} = 1.19 \times 10^{-2}$) に近いが、Takagaki ら³⁾の値や光易⁸⁾の値より大きい。また u_* 表示で得た Toba 係数 B は、Takagaki ら³⁾に基づく式 (22) が示唆するように、 u_* とともに若干減少するようにみえるが、同様の挙動が U_{10} 表示の Toba 係数 B_{10} でもみえることから、両者の傾向は必ずしも整合しない。

⑧ z m 高度の風速 U_z から u_* を求める場合には、Toba 係数 B は適用する C_d 式に依存して変化し、今回の 6 ケースの事例では Takagaki ら³⁾の式 (Taka1) に基づく 0.0586 から、Mitsuyasu・Kusaba⁷⁾の U_{10} べき乗型式 (MK2) に基づく 0.0625 の間の値をとる。この順位は実験・観測資料に対する解析から得られた順位と一致する。一方、 U_z から求めた U_{10} を用いる場合、Toba 係数 B_{10} は C_d 式にほぼ依存しない。

⑨ b) 外洋波浪共存ケースにおける Toba 係数 B や B_{10} は a) 内湾・内海波浪ケースのそれらに比べて小さい値をとる。これは b) 外洋波浪共存ケースにおいてより多く含まれるうねり成分の影響によると推定される。 B および B_{10} の小区間別平均値は a)、b) いずれのケースでも波高とともに急増してほぼ一定値に達するが、とくに b) ケースでの B の准平衡値は Toba 定数 ($B_T = 0.062$) より小さく、0.05 前後である。

⑩ 要するに、Toba 係数 B は必ずしも定数 ($B_T = 0.062$) と言えず、地点や u_* の計算法の相違により有

意な変動を伴う。しかし、地点ごとの相違が物理的要因によるものか、測定環境条件に係わる資料の統計的変動によるものか明らかでない。

最後に、Takagaki ら^[3]に対する著者らの 1 人（山口）による質問に丁寧な回答をお寄せ戴き、結果的に本研究の契機を与えられた京都大学大学院小森 悟教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] Donelan, M.A., Haus, B.K., Reul, N., Plant, W.J., Stiassnie, M., Graber, H.C., Brown, O.B. and E.S. Saltzman : On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18306, pp.1-5, doi:10.1029/2004GL019460, 2004.
- [2] Powell, M.D., Vickery P.J. and T.A.Reinhold : Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, 422, pp.279-283, doi:10.1038/nature01481, 2003.
- [3] Takagaki, N., Komori, S., Suzuki, N., Iwano, K., Kumamoto, T., Shimada, S., Kurose, R. and K. Takahashi : Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.39, L23604, pp.1-6, doi:10.1029/2012GL053988, 2012.
- [4] Iwano, K., Takagaki, N., Kurose, R. and S. Komori : Mass transfer velocity across the breaking air-water interface at extremely high wind speeds, *TellusB*, pp.1-8, 65, 21341, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.21341>, 2013.
- [5] Toba, Y. : Local balance in the air-sea boundary process, 1. on the growth process of wind waves, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.28, pp.109-120, 1972.
- [6] Wu, J. : Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions-a revisit, *Jour. Phys. Oceanogr.*, Vol.10, pp.727-740, 1980.
- [7] Mitsuyasu, H. and T. Kusaba : Drag coefficient over water surface under the action of strong wind, *Jour. Natural Disas. Sci.*, Vol.6, No.2, pp.43-50, 1984.
- [8] 光易 恒 : 海洋波の物理, 岩波書店, 210p., 1995.
- [9] Wilson, B.W. : Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1955, *Deutsch. Hydrogr. Zeit.*, 18, pp.114-130, 1965.
- [10] 鈴木 靖・鳥羽良明 : 風波飽和度の概念に基づく海面摩擦係数測定データの再評価, 京大防災研年報, 第 54 号 B, pp.655-672, 2011.
- [11] Mitsuyasu, H. : On the growth of the spectrum of wind-generated waves I, *Rept. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, Vol.16, pp.459-465, 1968.
- [12] 山口正隆・畑田佳男・野中浩一・日野幹雄 : SDP 風資料に基づく東京湾, 伊勢湾, 瀬戸内海の沿岸風・海上風・波高資料の精度評価, *土木学会論文集 B3 (海洋開発)*, Vol.68, No.2, pp.1935-1940, 2012.
- [13] 山口正隆・畑田佳男・田窪宏朗 : 波浪追算に基づく霞ヶ浦での波候の推定, *自然災害科学 J. JSNDS*, Vol.14-3, pp.235-245, 1995.
- [14] 山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一 : Erie 湖における推算波浪資料の相互比較, *水工学論文集*, 第 50 巻, pp.1297-1302, 2006.
- [15] Ebuchi, N., Toba,Y. and H. Kawamura : Statistical study on the local equilibrium between wind and wind waves by using data from ocean data buoy stations, *Jour. Oceanogr.*, Vol.48, pp.77-92, 1992.
- [16] 後藤智明・末次広児・小舟浩治 : 大阪湾の風と風波の関係, *海岸工学論文集*, 第 36 巻, pp.168-172, 1989.

[17] 後藤智明・小舟浩治・菊池政信・早川完治・手島道人：東京港の波浪特性と閉鎖海域の波浪推算手法，海岸工学論文集，第37巻，pp.185-189, 1990.

[18] Kahma, K.K. and C.J. Calkoen : Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves, Jour. Phys. Oceanogr., 22, pp.1389-1405, 1992.

付 録

A. 光易^[8]による風波の発達式における係数の補正の影響

光易^[8]は Mitsuyasu^[11]の式(27)および式(28)における係数を保持したままベキ数をそれぞれ 1/2 と 1/3 に変えているが，この操作により $\tilde{F} = 25 \sim 3,200$ に対して式(27)による値を 3.8～5.6%，式(28)による値を 3.2～4.7% 小さく評価することから，係数の修正が必要になると考えられる。すなわち， $\tilde{F} = 25 \sim 3,200$ でベキ数の変更に伴う誤差ができるだけ小さくなるように係数を決めれば，次式になる。

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 4 \times 1.38 \times 10^{-2} F_*^{1/2} = 5.52 \times 10^{-2} F_*^{1/2} \quad (\text{A-1})$$

$$\frac{u_* f_p}{g} = 1.046 F_*^{-1/3} \quad (\text{A-2})$$

したがって，Toba^[5]の 3/2 乗則は $T_p = 1.05T_s$ として次式で表される。

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 6.35 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{3/2} \quad (\text{A-3})$$

ここで，Toba 係数は定数 $B = 6.35 \times 10^{-2}$ をとる。この値は Toba^[5]の原式による 6.20×10^{-2} よりわずかに大きい。また，Toba^[5]の原式（後出の式(A-11)）に相当する次式も得られる。

$$\frac{E f_p^3}{g u_*} = 2.18 \times 10^{-4} \quad (\text{A-4})$$

Mitsuyasu・Kusaba^[7]による U_{10} のベキ乗型 C_d 式(16)を用いて，式(A-3)を U_{10} 表示に変換すれば，

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 8.06 \times 10^{-3} U_{10}^{0.164} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2} = B_{10} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2} \quad (\text{A-5})$$

である。Toba 係数 B_{10} は U_{10} の関数になり，Takagaki ら^[9]の式に基づく場合（すなわち， u_* 表示では u_* 依存性， U_{10} 表示では定数）と逆の特性をもつ。また，局所平衡則は次式で表される。

$$\frac{E f_p^3}{g U_{10}} = 3.51 \times 10^{-6} U_{10}^{0.328} \quad (\text{A-6})$$

さらに，式(A-1)および式(A-2)を光易^[8]と同様に， $C_d = 1.6 \times 10^{-3}$ として U_{10} 表示に変換すれば，

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 2.21 \times 10^{-3} \tilde{F}^{1/2} \quad (\text{A-7})$$

$$\frac{gT_s}{U_{10}} = 0.311 \tilde{F}^{1/3} \quad (\text{A-8})$$

が得られる。上式の係数は，光易^[8]ではそれぞれ 2.10×10^{-3} と 0.326 であるから，式(A-7)では少し増加し，式(A-8)では少し減少する。ついで，3/2 乗則および局所平衡則はそれぞれ

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 1.27 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}} \right)^{3/2} \quad (\text{A-9})$$

$$\frac{E f_p^3}{g U_{10}} = 8.72 \times 10^{-6} \quad (\text{A-10})$$

になる。式(A-9)の係数 1.27×10^{-2} は光易^[8]の原式である式(34)に与えた 1.13×10^{-2} より 12 %大きく、Wilson^[9]のIV型式(35)から得た式(37)の係数 1.26×10^{-2} に非常に近い。一方、式(A-10)の係数 8.72×10^{-6} は光易^[8]の原式による係数 6.84×10^{-6} より 27 %大きい、これは $(1.27/1.13)^2 = 1.26$ にほぼ相当する。

ついで、Toba^[5]の 3/2 乗則である式(25)から u_* 表示の局所平衡則

$$\frac{E f_p^3}{g u_*} = 2.08(2.07536) \times 10^{-4} \quad (\text{A-11})$$

が得られ、 $C_d = 1.6 \times 10^{-3}$ とすれば、 U_{10} 表示による 3/2 乗則と局所平衡則が次式のように書かれる。

$$\frac{g H_s}{U_{10}^2} = 1.24 \times 10^{-2} \left(\frac{g T_s}{U_{10}} \right)^{3/2} \quad (\text{A-12})$$

$$\frac{E f_p^3}{g U_{10}} = 8.30 \times 10^{-6} \quad (\text{A-13})$$

式(A-12)の右辺の係数は次式のように計算される。

$$B(u_*/U_{10})^{1/2} = B C_d^{1/4} = 0.062 \times (16 \times 10^{-4})^{1/4} = 0.062 \times 0.2 = 0.0124 \quad (\text{A-14})$$

式(A-12)の係数 1.24×10^{-3} は $C_d = 1.0 \times 10^{-3}$ では 1.10×10^{-2} 、 $C_d = 2.5 \times 10^{-3}$ では 1.39×10^{-2} に変わる。本文で述べた U_{10} に依存する C_d の各式では、この係数に U_{10} の依存性が現れる。

Table A1 は Mitsuyasu^[11]の式(27)および式(28)を、①そのまま使用、②Mitsuyasu^[11]のように $F_*^{0.504}$ を $F_*^{1/2}$ 、 $F_*^{-0.330}$ を $F_*^{-1/3}$ に変換した式を使用、③上記②による過小評価を補正するため、係数も 5.24 を 5.52 に、1.00 を 1.046 に変更した式を使用、という 3 つのケースについてそれぞれ C_d を① 1.6×10^{-3} 、②Mitsuyasu・Kusaba^[7]の式(16)($C_d = 2.60 \times 10^{-3} U_{10}^{0.654}$)の 2 つのケースとする場合の計 6 ケースについて求めた波浪統計量間の関係の一覧を示す。加えて、④本文で述べた Takagaki ら^[3]と Iwano ら^[4]による関係式、⑤Wilson^[9]のIV型式と⑥その近似式 ($\bar{F} < 10^3 \sim 10^4$) および⑦Toba^[5]の 3/2 乗則における Toba 定数も与える。

B. Takagaki ら^[3]の式による Toba 係数を Toba 定数 $B = 0.062$ に近づけるための工夫 ($U_{10c} = 30 \text{ m/s}$ の case)

本文の式(22)でみたように、Takagaki ら^[3]の式における Toba 係数は

$$B = 5.24 \times 10^{-2} u_*^{-0.1} ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \quad (\text{B-1})$$

であり、 U_{10} - u_* 関係 (C_d 式) 由来の u_* への依存性を示すのみならず、絶対値も $u_* > 0.186 \text{ m/s}$ ($U_{10} > 5.73 \text{ m/s}$) で Toba 定数 $B_T = 0.062$ より小さくなる。ここでは、Toba 係数を増加させるための 1 つの工夫を以下に述べる。すなわち、 $E f_p^3/g$ と U_{10} の関係を与える Takagaki ら^[3]の Figure 2 における実験値のばらつきをみると、 $E f_p^3/g = 2.27 \times 10^{-4}$ をとる U_{10} の限界値、すなわち限界風速 U_{10c} を Takagaki ら^[3]による 35.0 m/s や Iwano ら^[4]による 33.6 m/s でなく、30 m/s とすることも可能と思われる。そこで、 $2.27 \times 10^{-4} \approx 7.57 \times 10^{-6} \times 30$ を考慮して

$$\frac{E f_p^3}{g} = \begin{cases} 7.57 \times 10^{-6} U_{10} ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 2.27 \times 10^{-4} ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B-2})$$

とする。式(41)の第 1 式では係数 6.75×10^{-6} であるから、式(B-2)の係数は 1.12 倍 (=7.57/6.75) になる。ついで、 $E f_p^3/g \leq 2.27 \times 10^{-4}$ であるから、 $C_d \leq 2.55 \times 10^{-3}$ になる。この場合 C_d 式は式(8)の第 1 式に式(B-2)の第 1 式を代入すれば

$$C_d = \left[\frac{0.4}{\log\{1.42 \times 10^{-4} (7.57 \times 10^{-6} U_{10})^{-2}\}} \right]^2 \quad (\text{B-3})$$

Table A1 Mathematical relations between wave statistics related to wind wave growth based on Mitsuyasu^[8] study and other studies.

No.	Mitsuyasu's relations ①~③ other authors ④~⑦	$\frac{gT_s}{u_*}$	$\left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)\left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3/2}$	$\frac{E_f^3}{gu_*}$	C_d	$\frac{gH_s}{U_{10}^2} =$	$\frac{U_{10}f_p}{g} =$	$\frac{gT_s}{U_{10}}$	$\left(\frac{gH_s}{U_{10}^2}\right)\left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{-3/2} =$	$\frac{E_f^3}{gU_{10}}$
①	$\frac{gH_s}{u_*^2} = 5.24 \times 10^{-2} F_*^{0.504}$ $\frac{u_* f_p}{g} = 1.00 F_*^{-0.330}$	$0.952 F_*^{0.330}$	5.64×10^{-2} $\times F_*^{0.009}$	1.72×10^{-4} $\times F_*^{0.018}$	1.60×10^{-3}	2.15×10^{-3} $\times \bar{F}^{0.504}$	2.99 $\times \bar{F}^{-0.330}$	$0.319 \bar{F}^{0.330}$	$1.19 \times 10^{-2} \bar{F}^{0.009}$	$7.71 \times 10^{-6} \bar{F}^{0.018}$
②	$\frac{gH_s}{u_*^2} = 5.24 \times 10^{-2} F_*^{1/2}$ $\frac{u_* f_p}{g} = 1.00 F_*^{-1/3}$	$0.952 F_*^{1/3}$	5.64×10^{-2}	1.72×10^{-4}	1.60×10^{-3}	$2.10 \times 10^{-3} \bar{F}^{1/2}$	$2.92 \bar{F}^{-1/3}$	$0.326 \bar{F}^{1/3}$	1.13×10^{-2}	6.84×10^{-6}
③	$\frac{gH_s}{u_*^2} = 5.52 \times 10^{-2} F_*^{1/2}$ $\frac{u_* f_p}{g} = 1.046 F_*^{-1/3}$	$0.910 F_*^{1/3}$	6.35×10^{-2}	2.18×10^{-4}	2.60×10^{-4} $\times U_{10}^{0.654}$	8.45×10^{-4} $\times U_{10}^{0.327} \bar{F}^{1/2}$	$3.96 U_{10}^{-0.109}$ $\times \bar{F}^{-1/3}$	$0.240 U_{10}^{0.109}$ $\times \bar{F}^{1/3}$	7.19×10^{-3} $\times U_{10}^{0.1635}$	2.79×10^{-6} $\times U_{10}^{0.327}$
④	Takagaki et al. ^[8] (2012) + Iwano et al. ^[4] (2013)		$5.24 \times 10^{-2} u_*^{-0.1}$ $(u_* < 1.70 \text{ m/s})$ 4.97×10^{-2} $\times (1.70/u_*)^{1/2}$ $(u_* \geq 1.70 \text{ m/s})$	$4.46 \times 10^{-4} \times U_{10}^{1/2}$ $(U_{10} < 33.6 \text{ m/s})$ 2.55×10^{-3} $(U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s})$	$4.46 \times 10^{-4} \times U_{10}^{1/2}$ $(U_{10} < 33.6 \text{ m/s})$ 2.55×10^{-3} $(U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s})$	2.21×10^{-3} $\times \bar{F}^{1/2}$	$3.06 \bar{F}^{-1/3}$	$0.311 \bar{F}^{1/3}$	1.27×10^{-2}	8.72×10^{-6}
⑤	Wilson ^[9] IV (1965)					$0.30\{1 - (1 + 0.004 \bar{F}^{1/2})^{-2}\}$		$8.61 \times \{1 - (1 + 0.008 \bar{F}^{1/3})^{-5}\}$	1.26×10^{-2}	
⑥	Wilson ^[9] IV (1965) (simplified)					$2.40 \times 10^{-3} \times \bar{F}^{1/2}$ $(\bar{F} < 10^3 \sim 10^4)$		$0.344 \bar{F}^{1/3}$ $(\bar{F} < 10^3 \sim 10^4)$	1.19×10^{-2} $(\bar{F} < 10^3 \sim 10^4)$	7.62×10^{-6} $(\bar{F} < 10^3 \sim 10^4)$
⑦	Toba ^[5] (1972)		6.20×10^{-2}	2.08×10^{-4}	1.60×10^{-3}				1.24×10^{-2}	8.03×10^{-6}

①Mitsuyasu^[11] (1968), ②Mitsuyasu^[8] (1995) 0.504 → 1/2, 5.24 × 10⁻² → 5.52 × 10⁻²
0.330 → 1/3, ③Mitsuyasu^[8] (1995) — Yamaguchi et al. (2014) 0.504 → 1/2, 5.24 × 10⁻² → 5.52 × 10⁻²
0.330 → 1/3, 1.00 → 1.046
 $F_* = gF/u_*^2$, $\bar{F} = gF/U_{10}^2$, $T_p = 1.05T_s$

であり、式(B-2)の第2式を含めると次式になる。

$$C_d = \begin{cases} \{0.4/\log(2.48 \times 10^6/U_{10}^2)\}^2 & ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B-4})$$

つぎに、 $U_{10} = 2.5 \sim 30 \text{ m/s}$ (2.5 m/s 間隔) に対する式 (B-4) の値を

$$C_d = aU_{10}^b \quad (\text{B-5})$$

で近似し、 $U_{10} = 30 \text{ m/s}$ で $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ とするとともに、2つの方法で a , b を算出する。その1つ①は 2.5 m/s ごとの U_{10} に対して求めた b_i の平均値を b として a を算出する方法である。すなわち、これは n を資料数として次式で表される。

$$C_{di} = 2.55 \times 10^{-3} \left(\frac{U_{10i}}{30}\right)^b, \quad b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\log\{C_{di}/(2.55 \times 10^{-3})\}}{\log(U_{10i}/30)}, \quad a = \frac{2.55 \times 10^{-3}}{30^b} \quad (\text{B-6})$$

もう1つの②は 2.5 m/s ごとの U_{10} に対して求めた式(B-4)による C_d の資料に $U_{10} = 30 \text{ m/s}$ (一般的には限界風速 U_{10c}), $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ の条件のもとで最小2乗法 (LSM) により b を算出する方法であり、 b の計算式は次式で表される。

$$b = \frac{\sum_n \log x_i \cdot \log y_i}{\sum_n (\log x_i)^2}, \quad y_i = \frac{C_{di}}{2.55 \times 10^{-3}}, \quad x_i = \frac{U_{10i}}{30}, \quad a = \frac{2.55 \times 10^{-3}}{30^b} \quad (\text{B-7})$$

実際の適用では、両者の結果のうち、資料値に対する適合度の高い方を採用する。他の限界風速値 U_{10c} あるいは限界摩擦速度 u_{*c} の場合には式(B-6)あるいは式(B-7)における「30」を U_{10c} または u_{*c} に変えれば適用可能になる。

ここで①法の式(B-6)を適用した結果、 C_d の U_{10} 表示によるべき乗型近似式は式(B-4)の第2式とともに

$$C_d = \begin{cases} 5.36 \times 10^{-4} U_{10}^{0.459} & ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B-8})$$

で与えられる。 $U_{10} = 30 \text{ m/s}$ では $u_* = 1.52 (1.515) \text{ m/s}$ である。したがって、 U_{10} と u_* の関係は次式のようになる。

$$U_{10} = \begin{cases} (21.4u_*^{-0.187})u_* & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 19.8u_* & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B-9})$$

Table B1 は式(B-4), 式(B-8)のほか、本文中の Table 1 の Wu^[6], Mitsuyasu・Kusaba^[7] (MK1, MK2) による C_d の一覧を示す。これらは Table 1 の同種の結果と比べて Wu^[6] による結果に近づく。

続いて、式(21)に相当する式は

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3} = 7.57 \times 10^{-6} \times 16 \times 1.05^3 \left(\frac{U_{10}}{u_*}\right) = 1.40 \times 10^{-4} \times 21.4u_*^{-0.187} \quad (\text{B-10})$$

すなわち、式(22)と式(23)の相当式は

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = \begin{cases} 5.47 \times 10^{-2} u_*^{-0.0935} \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{3/2} & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 5.26 \times 10^{-2} \left(\frac{1.52}{u_*}\right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{3/2} & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B-11})$$

になる。ここに、式(B-11)第2式の展開は次式による。

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3} = \frac{2.27 \times 10^{-4} \times 16 \times 1.05^3}{(u_*/U_{10})U_{10}} = 27.7 \times 10^{-4} \times 1.52/u_* \quad (\text{B-12})$$

Table B2 は式(B-11)による Toba 係数の 100 倍値を与える。結果的には Toba 係数は式(22)および式(23)の係数と比べて 5~6 %増加する程度であり、 u_* への依存性は別にして全体的には Toba 定数 $B_T = 0.062$ より 15 %程度小さい。式(B-11)第1式の Toba 係数 B は u_* の増加とともに減少する。すな

Table B1 Change of C_d value with increase of 10 m height wind speed U_{10} for any of 5 C_d laws including modified versions of both Takagaki et al.^[3] and Iwano et al.^[4] laws.

U_{10} (m/s)	$C_d \times 10^3$				
	Wu	MK1	MK2	(B-4)	(B-8)
5	1.13	1.09	1.01	1.21	1.12
8	1.32	1.09	1.01	1.43	1.39
10	1.45	1.21	1.17	1.56	1.54
15	1.78	1.53	1.53	1.85	1.86
20	2.10	1.84	1.84	2.10	2.12
25	2.43	2.16	2.13	2.33	2.35
27.5	2.59	2.31	2.27	2.44	2.45
30	27.5	2.47	2.40	2.55	2.55

Table B2 Change of Toba coefficient B based on modified Takagaki et al.^[3] equation with increase of friction velocity u_* .

u_* (m/s)	U_{10} (m/s)	eq.(B-11) $B \times 10^2$	u_* (m/s)	U_{10} (m/s)	eq.(B-11) $B \times 10^2$
0.10	3.29	6.78	4.00	79.2	3.24
0.15	4.58	6.53	3.50	69.3	3.47
0.25	6.93	6.23	3.00	59.4	3.74
0.262	7.20	6.20	2.50	49.5	4.10
0.50	12.2	5.84	2.00	39.6	4.59
1.00	21.4	5.47	1.52	30.1	5.26

わち、Toba 係数 B は $u_* = 0.10$ m/s($U_{10} = 3.29$ m/s)で 0.0678, $u_* = 0.262$ m/s($U_{10} = 7.20$ m/s)で Toba 定数 B_T にあたる 0.062, $u_* = 1.52$ m/s($U_{10} = 30.1$ m/s)で 0.0526 をとり, そこから急減して $u_* = 4.00$ m/s($U_{10} = 79.2$ m/s)で 0.0324 と, Toba 定数 $B_T = 0.062$ の約 1/2 になる。

ついで, U_{10} による表示式では式(30)に対応する式は

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = \begin{cases} 1.18 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{3/2} & ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 1.18 \times 10^{-2} \left(\frac{30}{U_{10}}\right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{3/2} & ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B-13})$$

で表される。この場合の Toba 係数 $B_{10} = 1.18 \times 10^{-2}$ ($U_{10} < 30$ m/s) は光易^[8]による近似式(36)における係数 1.19×10^{-2} ($\bar{F} < 10^3 \sim 10^4$) とほぼ符合する。

さらに, 局所平衡則を表す式(41)に相当する式は

$$\frac{Ef_p^3}{gU_{10}} = \begin{cases} 7.57 \times 10^{-6} & ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 7.57 \times 10^{-6} \left(\frac{30}{U_{10}}\right) & ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B-14})$$

であり, 式(44)に相当する式は

$$\frac{Ef_p^3}{gu_*} = \begin{cases} \frac{1.62 \times 10^{-4}}{u_*^{0.187}} & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 1.49 \times 10^{-4} \left(\frac{1.52}{u_*}\right) & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{B} - 15)$$

になる。

Ef_p^3/gu_* は $u_* < 1.52 \text{ m/s}$ でも u_* への依存性を持ち、 Ef_p^3/gU_{10} は $U_{10} < 30 \text{ m/s}$ で定数をとる特性や、それ以外の超強風速域では Ef_p^3/gu_* 、 Ef_p^3/gU_{10} の両者とも u_* あるいは U_{10} への有意な依存性を示す特性は U_{10} の限界風速値 U_{10c} 、したがって u_* の限界風速値 u_{*c} の変更によっても変わらない。

C. u_* 表示による Ef_p^3/g を用いた検討(1) ($u_{*c} = 1.70 \text{ m/s}$ の case)

ここでは摩擦速度の限界値を $u_{*c} = 1.70 \text{ m/s}$ とする場合の Toba 係数に関する検討を行う。本文でみたように、Iwano ら^[4]による C_d 式を用いた Takagaki ら^[3]による結果に基づく 3/2 乗則における Toba 係数 B は、 $U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s}$ ($u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$) の風速条件のみならず $U_{10} < 33.6 \text{ m/s}$ ($u_* < 1.70 \text{ m/s}$) の風速条件のもとでも u_* 依存性をもつが、これは 3/2 乗則表示形の導出にあたって、係数が u_* または U_{10} に依存する C_d 式の利用を通じて生じたものである。

Takagaki ら^[3]では Ef_p^3/g (Figure 2) および C_d (Figure 1) の実験結果は U_{10} との関係で整理されているが、 U_{10} と u_* は線形関係からそれほど離れないことから、平均的な関係を表す曲線(直線)まわりの実験値のばらつきを考慮すると、 Ef_p^3/g および C_d は u_* との関係で表すことも可能と考えられる。

まず、Takagaki ら^[3]において C_d の上限値は $U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s}$ に対して $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ であるから、相当する u_* は $u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$ になる。そして、これに対応する Ef_p^3/g は式(7)から $Ef_p^3/g = 2.27 \times 10^{-4}$ ($U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s}$, $u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$)をとる。Figure 2において横軸を u_* とすると、 $Ef_p^3/g = 2.27 \times 10^{-4} = 1.335 \times 10^{-4} \times 1.70$ ($u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$)であるから、 Ef_p^3/g は $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ では1.70を u_* に変えた次式で表される。

$$\frac{Ef_p^3}{g} = \begin{cases} 1.335 \times 10^{-4} u_* & ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 2.27 \times 10^{-4} & ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{C} - 1)$$

また、式(7)に式(C-1)の第1式を代入すると、

$$C_d = [0.4/\log\{1.42 \times 10^{-4}(1.335 \times 10^{-4}u_*)^{-2}\}]^2 \quad (\text{C} - 2)$$

であり、式(11)に相当する C_d は u_* の全領域に対して次式になる。

$$C_d = \begin{cases} \{0.4/\log(0.797 \times 10^4/u_*^2)\}^2 & ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{C} - 3)$$

ついで $C_d = au_*^b$ として、 $u_* = 1.70 \text{ m/s}$ で $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ という条件のもとに $u_* = 0.10 \sim 1.70 \text{ m/s}$ (0.10 m/s 間隔)の範囲で式(C-3)の第1式を近似すれば、係数 a 、 b が付録Bと同様の㊦法で決定される。 u_* の全範囲に対する C_d のベキ乗型近似式は式(18)と式(17)に対応して次式で表される。

$$C_d = \begin{cases} 2.00 \times 10^{-3} u_*^{0.459} & ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{C} - 4)$$

$$U_{10} = \begin{cases} (22.4u_*^{-0.229})u_* & ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \text{ or } u_* = (1.777 \times 10^{-2}U_{10}^{0.297})U_{10} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 19.8u_* & ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{C} - 5)$$

式(C-5)の第1式では以下での使用を考えて $U_{10} - u_*$ 関係と $u_* - U_{10}$ 関係の両者を与えている。

続いて、 $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ では式(20)と式(C-1)から

$$\frac{Ef_p^3}{g} = \frac{u_*}{16 \times 1.05^3} \left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3} = 1.335 \times 10^{-4} u_* \quad (\text{C} - 6)$$

したがって、

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3} = 18.522 \times 1.335 \times 10^{-4} = 24.72687 \times 10^{-4} \quad (\text{C-7})$$

であるから、式(C-1)の第2式に基づく結果と合わせて次式になる。

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = \begin{cases} 4.97 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{3/2} & ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 4.97 \times 10^{-2} \left(\frac{1.70}{u_*}\right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{3/2} & ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{C-8})$$

すなわち、 $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ に対して Toba 係数 B は 4.97×10^{-2} と定数をとるが、Toba 定数 $B_T = 6.20 \times 10^{-2}$ の80%の大きさである。 $B = 4.97 \times 10^{-2}$ は式(22)あるいは式(23)で $u_* = 1.70 \text{ m/s}$ の場合の B に等しい。

要するに、Takagaki ら^[3]の Figure 2 における Ef_p^3/g の挙動を u_* の関数として式(C-1)で表す場合には、 $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ の領域に対して Toba の3/2乗則における係数 $B(= 4.97 \times 10^{-2})$ は、 C_d 式によって U_{10} 表示から u_* 表示に変換する本文中の係数 $B(= 524 \times 10^{-2}u_*^{-0.1})$ と異なり、Toba 定数($B_T = 6.20 \times 10^{-2}$)と同様に u_* に依存しない一定値をとるが、絶対値は Toba 定数の80%と小さい。一方、 $u_* \geq 1.70 \text{ m/s}$ の超強風速域では、Toba 係数 B は $u_*^{-1/2}$ に比例して減少することから、Toba の3/2乗則はもはや成立しないという特性は変わらない。さらに、 Ef_p^3/gu_* は式(C-1)より次式になる。

$$\frac{Ef_p^3}{gu_*} = \begin{cases} 1.335 \times 10^{-4} & ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 1.335 \times 10^{-4} \left(\frac{1.70}{u_*}\right) & ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{C-9})$$

式(44)の第1式は $u_*^{-0.2}$ の比例関係を示すのに対して、式(C-9)の第1式は定数をとる。また、第2式は式(44)または式(C-9)のいずれも u_* と逆比例の関係を与え、局所平衡則が成立しないことを表す。

一方、式(C-5)の第1式(2番目)を用いて式(C-7)を U_{10} 表示に変換すれば、

$$\begin{aligned} \left(\frac{gH_s}{U_{10}^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{-3} &= 16 \times 1.05^3 \times 1.335 \times 10^{-4} \left(\frac{u_*}{U_{10}}\right) = 24.727 \times 1.777 \times 10^{-2} U_{10}^{0.297} \\ &= 43.94 \times 10^{-6} U_{10}^{0.297} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (\text{C-10})$$

であり、式(C-1)の第2式も次式になる。

$$\left(\frac{gH_s}{U_{10}^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{-3} = \frac{42.04 \times 10^{-4}}{U_{10}} ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \quad (\text{C-11})$$

したがって、両者の結合から gH_s/U_{10}^2 は次式で表される。

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = \begin{cases} 6.63 \times 10^{-3} U_{10}^{0.149} \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{3/2} & ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 1.12 \times 10^{-2} \left(\frac{33.6}{U_{10}}\right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{3/2} & ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{C-12})$$

式(30)の第1式と異なり、式(C-12)の第1式においては Toba 係数 B_{10} に U_{10} 依存性が現れる。この場合、Toba 係数 B_{10} の最大値は 1.12×10^{-2} であり、 $U_{10} < 33.6 \text{ m/s}$ ではより小さい値から 1.12×10^{-2} に漸近する。この挙動は Fig. 9 や Fig. 20 に示した観測値に基づく挙動と必ずしも整合しない。

結局、 Ef_p^3/g と u_* の関係(式(C-1)の第1式)を用いる場合、Toba 係数 B は定数をとるが、Toba 定数 $B_T = 0.062$ の80%と小さいし、 U_{10} 表示に変換すると Toba 係数 B_{10} には極限值 1.12×10^{-2} に向かう U_{10} への正の依存性が現れ、観測に基づく特性と必ずしも符合しないことになる。

D. u_* 表示による Ef_p^3/g を用いた検討(2) ($u_{*c} = 1.52 \text{ m/s}$ の case)

付録 C では摩擦速度 u_* の限界値を $u_{*c} = 1.70 \text{ m/s}$ とした場合の 3/2 乗則表示式の導出を行ったが、ここでは付録 B に対応して $u_{*c} = 1.52 \text{ m/s}$ とした場合の展開をはかる。この際、付録 C と異なる数値をとるだけで導出過程は同一であるので、付録 C の文をそのまま用い、数値のみ変更する。

まず、Takagaki ら^[3]において C_d の上限値は $U_{10} \geq 30 \text{ m/s}$ に対して $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ であるから、相当する u_* は $u_* \geq 1.52(1.515) \text{ m/s}$ になる。そして、これに対応する Ef_p^3/g は式(7)から $Ef_p^3/g = 2.27 \times 10^{-4}$ ($U_{10} \geq 30 \text{ m/s}$, $u_* \geq 1.52 \text{ m/s}$)をとる。Takagaki ら^[3]の Figure 2 において横軸を u_* とすると、 $Ef_p^3/g = 2.27 \times 10^{-4} = 1.493 \times 10^{-4} \times 1.52$ ($u_* \geq 1.52 \text{ m/s}$)であるから、 Ef_p^3/g は $u_* < 1.52 \text{ m/s}$ では 1.52 を u_* に変えた次式で表される。

$$\frac{Ef_p^3}{g} = \begin{cases} 1.493 \times 10^{-4} u_* & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 2.27 \times 10^{-4} & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{D-1})$$

また、式(8)の第 1 式に式(D-1)の第 1 式を代入すると、

$$C_d = [0.4/\log\{1.42 \times 10^{-4}(1.493 \times 10^{-4} u_*)^{-2}\}]^2 \quad (\text{D-2})$$

であり、式(C-3)に相当する C_d は u_* の全領域に対して次式になる。

$$C_d = \begin{cases} \{0.4/\log(0.637 \times 10^4/u_*^2)\}^2 & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{D-3})$$

ついで $C_d = au_*^b$ として、 $u_* = 1.52 \text{ m/s}$ で $C_d = 2.55 \times 10^{-3}$ という条件のもとに $u_* = 0.10 \sim 1.40 \text{ m/s}$ (0.10 m/s 間隔)の範囲で式(D-3)の第 1 式を近似すれば、係数 a , b が付録 B と同様の④法で決定される。 u_* の全範囲に対する C_d および U_{10} のべき乗型近似式は式(C-4)と式(C-5)に対応して次式で表される。

$$C_d = \begin{cases} 2.11 \times 10^{-3} u_*^{0.458} & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 2.55 \times 10^{-3} & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{D-4})$$

$$U_{10} = \begin{cases} (21.8 u_*^{-0.229}) u_* & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \text{ or } u_* = (1.837 \times 10^{-2} U_{10}^{0.297}) U_{10} ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 19.8 u_* & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{D-5})$$

式(D-5)の第 1 式では以下での使用を考えて $U_{10} - u_*$ 関係と $u_* - U_{10}$ 関係の両者を与えている。

続いて、 $u_* < 1.52 \text{ m/s}$ では式(20)と式(D-1)から

$$\frac{Ef_p^3}{g} = \frac{u_*}{16 \times 1.05^3} \left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3} = 1.493 \times 10^{-4} u_* \quad (\text{D-6})$$

したがって、

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3} = 18.522 \times 1.493 \times 10^{-4} = 27.6533 \times 10^{-4} \quad (\text{D-7})$$

であるから、式(D-1)の第 2 式に基づく結果と合わせて次式になる。

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = \begin{cases} 5.26 \times 10^{-2} \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{3/2} & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 5.26 \times 10^{-2} \left(\frac{1.52}{u_*}\right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{3/2} & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{D-8})$$

式(D-8)第 1 式の係数 5.26×10^{-2} は式(C-8)第 1 式の係数 4.97×10^{-2} に比べて 5.8 %大きい。第 2 式についても同じである。Toba 定数 $B_T = 6.2 \times 10^{-2}$ を基準にとると、 $u_* < 1.52 \text{ m/s}$ に対して Toba 係数 B は 5.26×10^{-2} と定数をとるが、Toba 定数 $B_T = 6.20 \times 10^{-2}$ の 85 %の大きさである。 $B = 5.26 \times 10^{-2}$ は式(B-10)の第 1 式あるいは第 2 式で $u_* = 1.52 \text{ m/s}$ の場合の B に等しい。

要するに、Takagaki ら^[3]の Figure 2 における Ef_p^3/g の挙動を u_* の関数として式(D-1)で表す場合に

は、 $u_* < 1.52$ m/s の領域に対して Toba の 3/2 乗則における係数 $B(= 5.26 \times 10^{-2})$ は、 C_d 式によって U_{10} 表示から u_* 表示に変換する付録 B 中の係数 $B(= 5.47 \times 10^{-2} u_*^{-0.0935})$ と異なり、Toba 定数 ($B_T = 6.20 \times 10^{-2}$) と同様に u_* に依存しない一定値をとるが、絶対値は Toba 定数の 85 % と小さい。一方、 $u_* \geq 1.52$ m/s の超強風速域では、Toba 係数 B は $u_*^{-1/2}$ に比例して減少することから、Toba の 3/2 乗則はもはや成立しないという特性は変わらない。さらに、 Ef_p^3/gu_* は式(D-1)より次式になる。

$$\frac{Ef_p^3}{gu_*} = \begin{cases} 1.493 \times 10^{-4} & ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 1.493 \times 10^{-4} \left(\frac{1.52}{u_*}\right) & ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{D-9})$$

式(B-15)の第 1 式は $u_*^{-0.187}$ の比例関係を示すのに対して、式(D-9)の第 1 式は定数をとる。また、第 2 式は式(B-15)または式(D-9)のいずれも u_* と逆比例の関係を与え、局所平衡則が成立しないことを表す。

一方、式(D-5)の第 1 式 (2 番目の式) を用いて式(D-7)を U_{10} 表示に変換すれば、

$$\begin{aligned} \left(\frac{gH_s}{U_{10}^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{-3} &= 16 \times 1.05^3 \times 1.493 \times 10^{-4} \left(\frac{u_*}{U_{10}}\right) = 27.6533 \times 10^{-4} \times 1.837 \times 10^{-2} U_{10}^{0.297} \\ &= 50.80 \times 10^{-6} U_{10}^{0.297} ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (\text{D-10})$$

であり、式(D-1)の第 2 式も次式になる。

$$\left(\frac{gH_s}{U_{10}^2}\right)^2 \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{-3} = \frac{42.04 \times 10^{-4}}{U_{10}} ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \quad (\text{D-11})$$

したがって、両者の結合から gH_s/U_{10}^2 は次式で表される。

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = \begin{cases} 7.13 \times 10^{-3} U_{10}^{0.149} \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{3/2} & ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 1.18 \times 10^{-2} \left(\frac{30}{U_{10}}\right)^{1/2} \left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{3/2} & ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{D-12})$$

式(30)の第 1 式や式(B-13)の第 1 式と異なり、式(D-12)の第 1 式においても式(C-12)の第 1 式と同様に Toba 係数 B_{10} に U_{10} 依存性が現れる。付録 C の結果と比べて、その挙動は数値が 5%程度大きいだけで、変わらない。

結局、 $Ef_p^3/gU_{10} = \alpha = \text{const}$ の場合 (付録 A, B)、 u_* 依存の C_d 式を通じて Ef_p^3/gu_* に対応した Toba の 3/2 乗則における Toba 係数 B は u_* への弱い依存性を示し、 U_{10} 表示の 3/2 乗則における Toba 係数 B_{10} は定数 1.12×10^{-2} (付録 A ; $U_{10c} = 33.6$ m/s)、あるいは 1.18×10^{-2} (付録 B ; $U_{10c} = 30$ m/s) をとる。

一方、 $Ef_p^3/gu_* = \beta = \text{const}$ の場合 (付録 C, D)、Toba の 3/2 乗則の Toba 係数は定数になるが、値そのものは Toba 定数 ($B_T = 6.20 \times 10^{-2}$) の 80 % (4.97×10^{-2} , 付録 C ; $u_{*c} = 1.70$ m/s) あるいは 85 % (5.26×10^{-2} , 付録 D ; $u_{*c} = 1.52$ m/s) を与え、 U_{10} 表示の 3/2 乗則における Toba 係数 B_{10} には u_* 表示の C_d 則を通じて U_{10} 依存性が生じる。これらは u_* または U_{10} 依存性に関してシーソーの関係にあることを表しており、両者に整合性をもたせることが今後の課題であろう。なお、限界風速値 (u_{*c} , U_{10c}) を上まわる場合には Toba 係数に $u_*^{-1/2}$ あるいは $U_{10}^{-1/2}$ 依存性が生じるので、Toba 定数は存在しえない。

最後に、式(D-1)の第 1 式の形で Toba 定数 $B_T = 0.062$ を得るために、とるべき係数を算出する。まず、

$$\frac{Ef_p^3}{g} = \alpha u_* \quad (\text{D-13})$$

とすると、

$$\frac{Ef_p^3}{g} = \frac{u_*}{16} \left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right)^2 \left(\frac{gT_p}{u_*} \right)^{-3} = \frac{u_*}{16} \left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{-3} \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^{-3} = \alpha u_* \quad (\text{D-14})$$

である。 $T_p/T_s = 1.05$ とすると、上式は

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right)^2 \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{-3} = 16 \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^3 \cdot \alpha = 16 \times 1.05^3 \alpha \quad (\text{D-15})$$

と書かれ、ここで Toba 定数 $B_T = 0.062$ とおくと、

$$\left(\frac{gH_s}{u_*^2} \right) \left(\frac{gT_s}{u_*} \right)^{-3/2} = (16 \times 1.05^3)^{1/2} \alpha^{1/2} = 0.062 \quad (\text{D-16})$$

になる。したがって

$$\alpha = (0.062)^2 / (16 \times 1.05^3) = 2.07536 \times 10^{-4} \quad (\text{D-17})$$

を得る。式(D-1)の第1式では $\alpha = 1.493 \times 10^{-4}$ であるから、これに比べて上式の α は 39 % 大きい。

ここで、 $u_{*c} = 1.52 \text{ m/s}$ とすると、

$$\frac{Ef_p^3}{g} = 2.07536 \times 10^{-4} \times 1.52 = 3.15455 \times 10^{-4} \text{ (m/s)} \quad (\text{D-18})$$

である。すなわち、Toba 定数 $B_T = 0.062$ を得るためには Ef_p^3/g (の上限値) は Takagaki ら^[3]による $2.27 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$ でなく、これより約 39 % 大きい $3.15 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$ をとる必要がある。

Fig. D1 は (a) 内湾・内海 (Toba 係数の平均値 $B_m = 0.0586$)、(b) 大阪湾の MT 局 ($B_m = 0.0620$)、(c) 東京灯標 ($B_m = 0.0517$) における観測資料から得た Ef_p^3/g の資料を U_{10} との関係で図示したものであり、図中には U_{10} の 1 m/s ごとの区間における Ef_p^3/g 資料の平均値と標準偏差および U_{10} の区間別平均値 U_{10m} を表す。ここでの目的は個々の Ef_p^3/g 資料の分布状況を提示することにあるので、横軸を u_* でなく U_{10} としても問題はない。各 Ef_p^3/g 資料は本文で述べた 9 つの条件を課して抽出されている。図をみると、 Ef_p^3/g のうち、 $2.27 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$ を越える資料はほとんどないし、最大のものでも 3×10^{-4} 以下であり、式(D-18)に与えた 3.15×10^{-4} に達しない。ただし、風速 U_{10} の最大値は 25 m/s 以下であり、 Ef_p^3/g の資料は超強風速時を対象とした資料になっていない。今後、衛星データやブイデータに注目して 30 m/s を越える超強風速時における風・波浪観測資料を収集する必要がある。

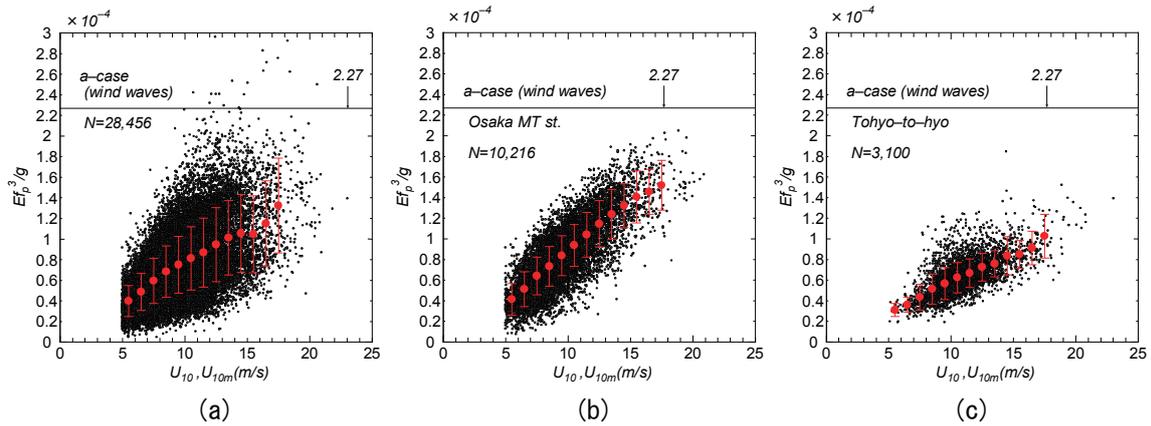


Fig. D1 Relation between Ef_p^3/g and U_{10} based on any of (a) observations at 17 stations, (b) observations at MT station in Osaka Bay and (c) observations at Tokyo to-hyo station in Tokyo Bay. Each figure gives mean and standard deviation of U_{10} -segment-grouped Ef_p^3/g and corresponding mean U_{10m} .

E. U_{10} 表示および u_* 表示による Ef_p^3/g を用いた検討のまとめ

Takagaki ら^[3]の実験資料を活用するために、グラフ上の資料値読取り用のフリーソフトを用いて、①Takagaki ら^[3]の Figure 1(a)から z_0 と $U_{10}(z_0)$ の読取り、Figure 1(b)から C_d と $U_{10}(C_d)$ の読取りと $u_* (= C_d^{1/2} U_{10}(C_d))$ の算出を行ったのち、2種類の U_{10} の良好な一致を確認した。これにより、 z_0 、 $U_{10}(z_0)$ 、 C_d 、 $U_{10}(C_d)$ 、 u_* の実験値を得た。ついで、②Figure 2 から $Ef_p^3/g (= \tilde{E})$ と $U_{10}(\tilde{E})$ の読取りを行った。Figure 2 の資料数($N = 27$)はFigure 1 の資料数($N = 15$)より多いことから、両資料において U_{10} がほぼ一致する資料とそれ以外の資料に分別した。Figure 2 における $U_{10}(\tilde{E})$ はFigure 1 における $U_{10}(C_d)$ を 13 ケース含んでいたが、両者の U_{10} が若干対応しない資料もある。さらに、③Figure 4 からの $u_{*measured} (= u_{*meas})$ の読取りを行った。そして、Figure 1(b)から得た u_* とFigure 4 から得た $u_{*measured}$ (u_* の数より多い)の対応を確認し、残りの $u_{*measured}$ を不採用とした。

Table E1 は z_0 、 $U_{10}(z_0)$ 、 $U_{10}(C_d)$ 、 $U_{10}(\tilde{E})$ 、 C_d 、 u_* 、 u_{*meas} 、 u_{*cal} 、 $U_{10}(\tilde{E})$ (再録)、 \tilde{E} 、 B 、 B_{cal} 、 B_{10} の一覧を与える。 \tilde{E} に関する $U_{10}(\tilde{E})$ 、 \tilde{E} 、 u_{*cal} 、 B_{cal} 、 B_{10} は資料数が多いため、2 段の表示としている。最後の 5 列を除く各列の变量は同一行で関連しているのに対して、最後の 5 列はそれ以外の列の变量と独立している。 u_{*cal} は \tilde{E} を入力値とした式(5)と式(1)による計算値 U_{10}/u_* の逆数と $U_{10}(\tilde{E})$ の積による。この表から、 $U_{10}(z_0)$ と $U_{10}(C_d)$ と $U_{10}(\tilde{E})$ 、および u_* と u_{*meas} と u_{*cal} について u_{*cal} の 2 例を除き、それぞれかなり良好な符合が確認される。また、以下に提示するように、 z_0 と $U_{10}(z_0)$ のプロット図、 C_d と $U_{10}(C_d)$ のプロット図、 $Ef_p^3/g (= \tilde{E})$ と $U_{10}(\tilde{E})$ のプロット図はそれぞれ Takagaki ら^[3]の Figure 1(a)、Figure 1(b)、Figure 2 のプロット図とよく符合する。要するに、資料値の読取り精度はかなり高いとみなされる。以下、 U_{10} に付随する添字を省略する。

Fig. E1 は(a) z_0 と U_{10} 、(b) C_d と U_{10} 、(c) Ef_p^3/g と U_{10} 、(d) z_0 と u_* 、(e) C_d と u_* 、(f) Ef_p^3/g と u_* の関係を与える。すなわち、 z_0 、 C_d 、 Ef_p^3/g に対して(a)~(c)の 3 枚は U_{10} との関係、(d)~(f)の 3 枚は u_* との関係を表す。上述のように、(a)~(c)における各データ点のプロット状況は Takagaki ら^[3]の Figure 1(a)、(b)および Figure 2 ときわめて類似する。 z_0 、 C_d 、 Ef_p^3/g の各資料値は $U_{10} \geq 33.6$ m/s あるいは 30 m/s、 $u_* \geq 1.70$ m/s あるいは 1.52 m/s で、概略の近似では平均的に一定の値をとるようみえる。(a)図から順にみると、図中の曲線は $U_{10} < 33.6$ m/s の場合、本文中の式(5)と式(10)から

$$z_0 = \left(\frac{6.9 \times 10^5}{9.8} \right) \left(\frac{Ef_p^3}{g} \right)^2 = \left(\frac{6.9 \times 10^5}{9.8} \right) \times (6.75 \times 10^{-6})^2 = 3.21 \times 10^{-6} U_{10}^2 ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \quad (\text{E-1})$$

$U_{10} < 30$ m/s の場合、式(5)と式(B-2)の第 1 式から

$$z_0 = 4.03 \times 10^{-6} U_{10}^2 ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \quad (\text{E-2})$$

である。それぞれの風速の限界値 U_{10c} 以上では本文中の式(5)に示すように、上限値 $z_0 = 0.363$ cm をとる。また、赤で示した実線は Takagaki ら^[3]の Figure 1(a)における最適曲線を近似した

$$z_0 = 3.91 \times 10^{-7} U_{10}^{2.60} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \quad (\text{E-3})$$

を表す。最適曲線 (LSM) は資料値の平均的挙動を近似するが、式(E-1)、式(E-2)はこの順に資料値より大きい値を与え、絶対値としての対応がやや不十分である。

(b)図では、 C_d と z_0 は対数則を表す式(3)を通じて対応することから、 C_d は z_0 と同じ挙動をとる。この場合の最適曲線 (LSM) は

$$C_d = 3.09 \times 10^{-4} U_{10}^{0.601} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \quad (\text{E-4})$$

で近似される。 C_d の資料値は C_d (あるいは U_{10}) が大きい領域では $U_{10} < 30$ m/s に対応する付録 B の式(B-4)に、これが小さい領域では $U_{10} < 33.6$ m/s に対応する式(11)に近いが、いずれの曲線よりも小さい値を与える。

Table E1 A set of experimental data sample digitized from figures in Takagaki et al.[3].

$z_0 \times 10^3$ (mm)	$U_{10}(z_0)$ (m/s)	$U_{10}(C_d)$ (m/s)	$U_{10}(\bar{E})$ (m/s)	$C_d \times 10^3$	u_* (m/s)	u_{*meas} (m/s)	u_{*cal} (m/s)	$U_{10}(\bar{E})$ (m/s)	$\bar{E} \times 10^4$ (m/s)	B	B_{cal}	B_{10}	$U_{10}(\bar{E})$ (m/s)	$\bar{E} \times 10^4$ (m/s)	u_{*cal} (m/s)	B_{cal}	B_{10}	
0.064	7.08	7.11	7.00	1.11	0.237	0.238	0.227	7.00	0.247	0.0439	0.0449	0.0081	6.13	0.124	0.179	0.0359	0.0061	
0.220	11.40	11.31	11.16	1.38	0.420	0.425	0.442	11.16	0.763	0.0580	0.0566	0.0113	5.91	0.237	0.190	0.0481	0.0086	
0.488	16.76	16.65	16.41	1.61	0.667	0.661	0.698	16.41	1.082	0.0548	0.0536	0.0111	15.75	0.856	0.638	0.0498	0.0100	
0.693	21.43	21.33	21.23	1.71	0.883	0.889	0.989	21.23	1.629	0.0585	0.0552	0.0119	16.41	1.186	0.712	0.0555	0.0116	
3.654	29.72	29.74	29.54	2.51	1.490	1.482	1.451	29.54	2.031	0.0502	0.0509	0.0113	28.01	1.928	1.358	0.0513	0.0113	
4.012	33.69	33.62	33.26	2.55	1.697	1.685	1.619	33.26	1.959	0.0462	0.0473	0.0104	27.35	2.268	1.381	0.0552	0.0124	
5.071	39.91	39.92	39.61	2.73	2.084	2.092	1.931	39.61	1.969	0.0418	0.0435	0.0096	38.07	2.588	1.988	0.0491	0.0112	
4.012	41.47	41.05	40.92	2.56	2.077		1.995	40.92	1.969	0.0419	0.0428	0.0094	39.39	2.268	1.989	0.0460	0.0103	
3.175	48.03	48.00	47.92	2.42	2.360	2.331	2.360	47.92	2.052	0.0401	0.0401	0.0089	48.36	2.371	2.469	0.0422	0.0095	
2.512	56.50	56.24	56.24	2.27	2.682	2.728	2.820	56.24	2.206	0.0390	0.0381	0.0085	50.11	2.268	2.530	0.0408	0.0092	
3.740	57.54	57.70	57.55	2.51	2.892	2.923	2.955	57.55	2.423	0.0394	0.0390	0.0088	58.42	2.567	3.044	0.0395	0.0090	
4.406	65.83	65.94	66.30	2.64	3.390	3.355	3.281	66.30	2.093	0.0338	0.0344	0.0076	60.83	1.969	2.965	0.0351	0.0077	
2.891	67.90	67.88	68.93	2.38	3.312	3.388	3.406	68.93	2.082	0.0341	0.0336	0.0075	65.65	2.216	3.295	0.0353	0.0079	
1.810	22.98	22.79		2.13	1.052								69.15	2.299	3.503	0.0349	0.0078	
3.569	24.88	24.57		2.48	1.222													

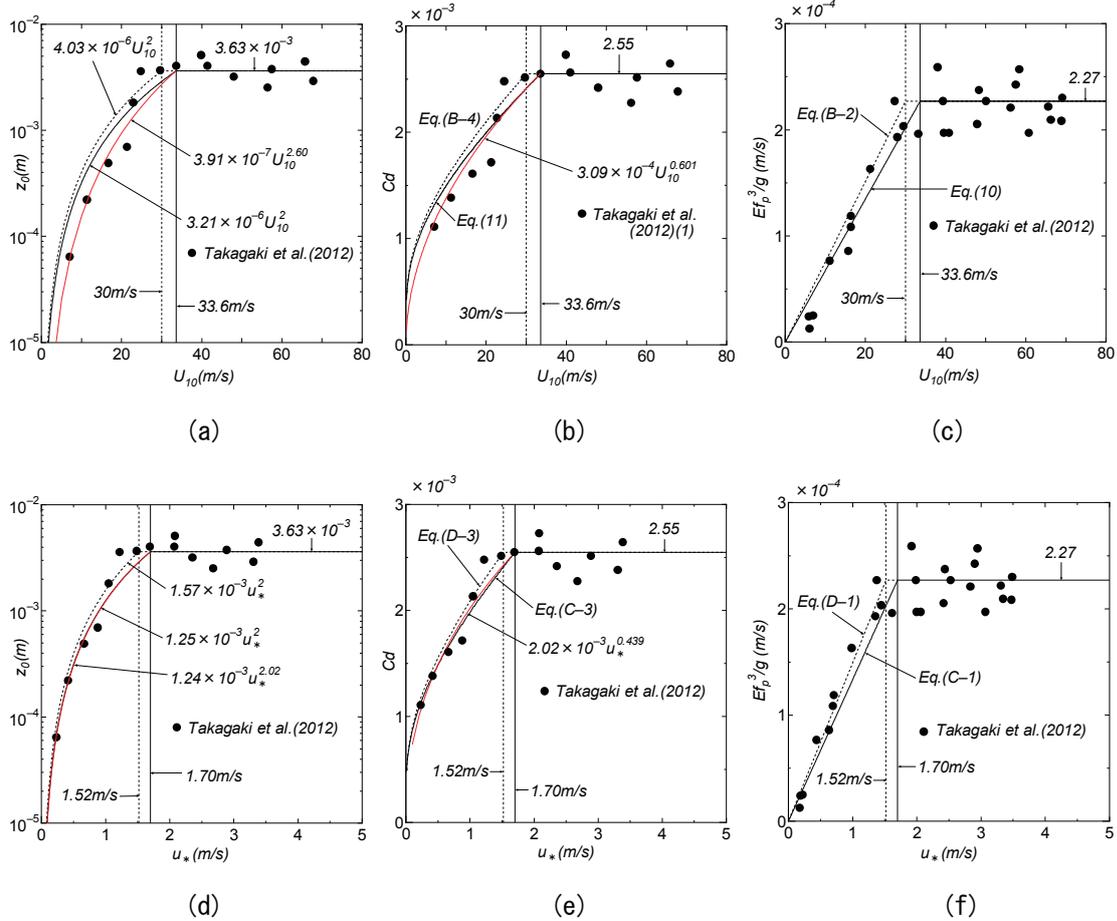


Fig. E1 Relation between any of (a) z_0 and U_{10} , (b) C_d and U_{10} , (c) Ef_p^3/g and U_{10} , (d) z_0 and u_* , (e) C_d and u_* , (f) Ef_p^3/g and u_* , based on either empirical equations or experiments by Takagaki et al.[3].

(c) 図では、図中の直線は $U_{10} < 33.6 \text{ m/s}$ の場合式(10)、 $U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s}$ の場合式(9)、 $U_{10} < 30 \text{ m/s}$ の場合式(B-2)の第1式、 $U_{10} \geq 30 \text{ m/s}$ の場合第2式による。実験値の挙動は式(10)、式(B-2)第1式のいずれによっても近似されるが、式(B-2)の第1式は実験値の上限に近い値を、式(10)は平均的な値を与える。

(d) 図では、図中の曲線は $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ の場合、本文中の式(5)と付録Cの式(C-1)から

$$z_0 = \left(\frac{6.9 \times 10^5}{9.8} \right) \left(\frac{Ef_p^3}{g} \right)^2 = \left(\frac{6.9 \times 10^5}{9.8} \right) \times (1.335 \times 10^{-4} u_*^2)^2$$

$$= 1.255483 \times 10^{-3} u_*^2 \approx 1.25(5) \times 10^{-3} u_*^2 ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \quad (\text{E-5})$$

$u_* < 1.52 \text{ m/s}$ の場合、本文中の式(5)と付録Dの式(D-1)から

$$z_0 = 1.57 \times 10^{-3} u_*^2 ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \quad (\text{E-6})$$

が得られる。それぞれの風速の限界値 u_{*c} 以上では $z_0 = 0.363 \text{ cm}$ をとる。また、図中の赤線は最適曲線 (LSM)

$$z_0 = 1.24 \times 10^{-3} u_*^{2.02} \quad (\text{E-7})$$

を表す。式(E-7)は $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ に対する式(E-5)とほぼ一致する。各資料値は $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ に対する式(E-5)や $u_* < 1.52 \text{ m/s}$ に対する式(E-6)と比較的よく対応する。

(e) 図でも、 $u_* < 1.70 \text{ m/s}$ に対する式(C-3)と $u_* < 1.52 \text{ m/s}$ に対応する式(D-3)は(b) 図と同様の挙動をとる。最適曲線 (LSM) は

$$C_d = 2.02 \times 10^{-3} u_*^{0.439} ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \quad (\text{E-8})$$

で与えられ、ばらつきを伴う資料値の平均的挙動を表す。これは式(C-4)の第 1 式 ($C_d = 2.00 \times 10^{-3} u_*^{0.459}$) とかなり近い。

(f) 図では、 $u_{*c} = 1.70 \text{ m/s}$ に対して式(C-1)、 $u_{*c} = 1.52 \text{ m/s}$ に対して式(D-1)に基づく Ef_p^3/g と u_* の関係を表す。この場合には、 Ef_p^3/g と U_{10} の関係と異なり、実験値の挙動は $u_* < 1.52 \text{ m/s}$ に対応する式(D-1)の第 1 式でよりよく近似されるように見える。

Fig. E2 は Fig. E1 に与えた (a) z_0 と U_{10} , (b) C_d と U_{10} , (c) Ef_p^3/g と U_{10} , (d) z_0 と u_* , (e) C_d と u_* , (f) Ef_p^3/g と u_* の図にそれぞれ鈴木・鳥羽^[10]により収集された実験値 (Masuda・Kusaba, Toba, Banner・Peirson のほか、新たに Komori et al.) を加えた図を与える。各図において資料値のばらつきが大きくなるが、 z_0 , C_d , Ef_p^3/g がそれぞれの限界値内で U_{10} あるいは u_* とともに増加する傾向が異なる条件下で得られた資料値によっても支持される。また、 U_{10} より u_* を変数とする場合に資料値のばらつきが小さくなる。

Fig. E3 の (a) は Takagaki ら^[3]に加えて鈴木・鳥羽^[10]により収集された実験資料 (Masuda・Kusaba, Toba, Banner・Peirson) より得た C_d と Ef_p^3/g の関係を示す。図中の曲線は本文中の式(8)を表す。いずれの実験値も C_d が Ef_p^3/g とともに増加する傾向や Takagaki ら^[3]の実験値のうち $U_{10} > 30 \text{ m/s}$ を越える

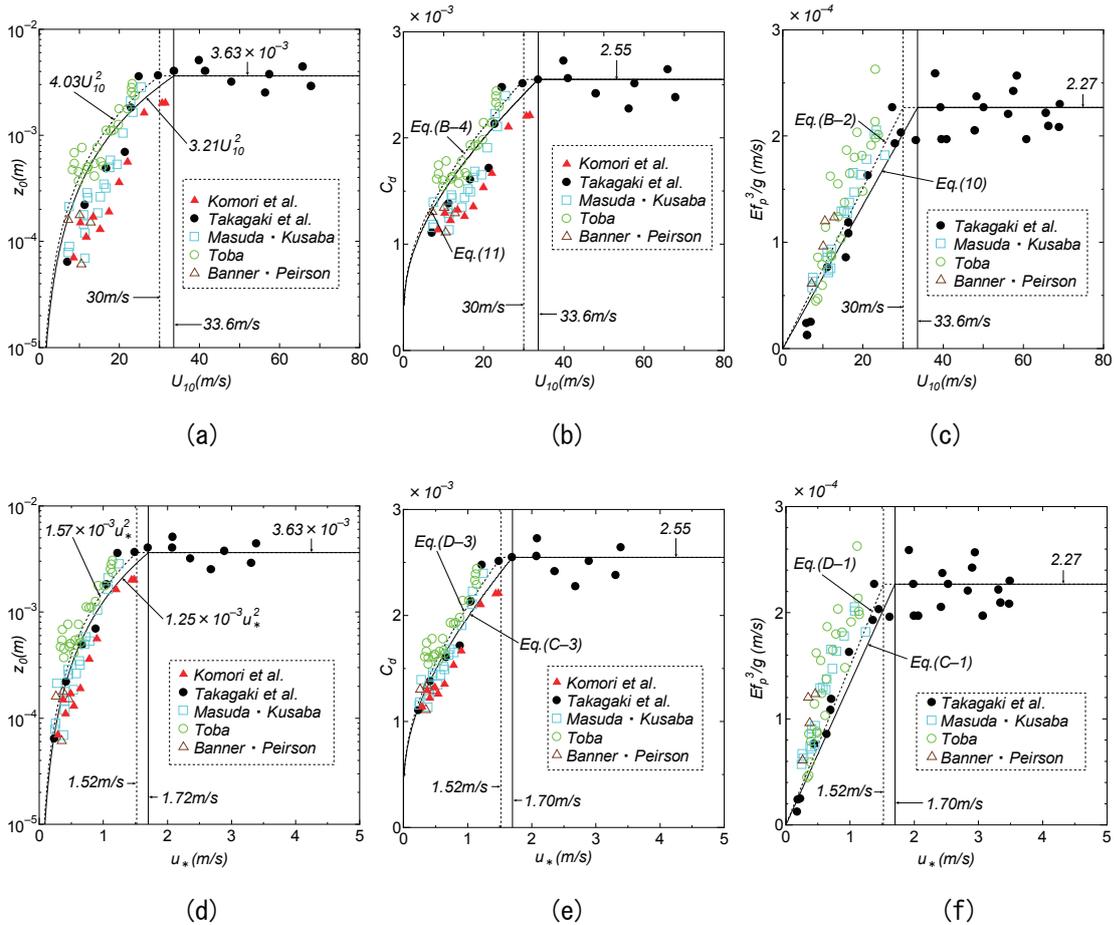


Fig. E2 Relation between any of (a) z_0 and U_{10} , (b) C_d and U_{10} , (c) Ef_p^3/g and U_{10} , (d) z_0 and u_* , (e) C_d and u_* , (f) Ef_p^3/g and u_* , based on either empirical equations or Suzuki and Toba^[10]-collected experiments added to Takagaki et al.^[3] and Komori et al.(1999) experimental data samples.

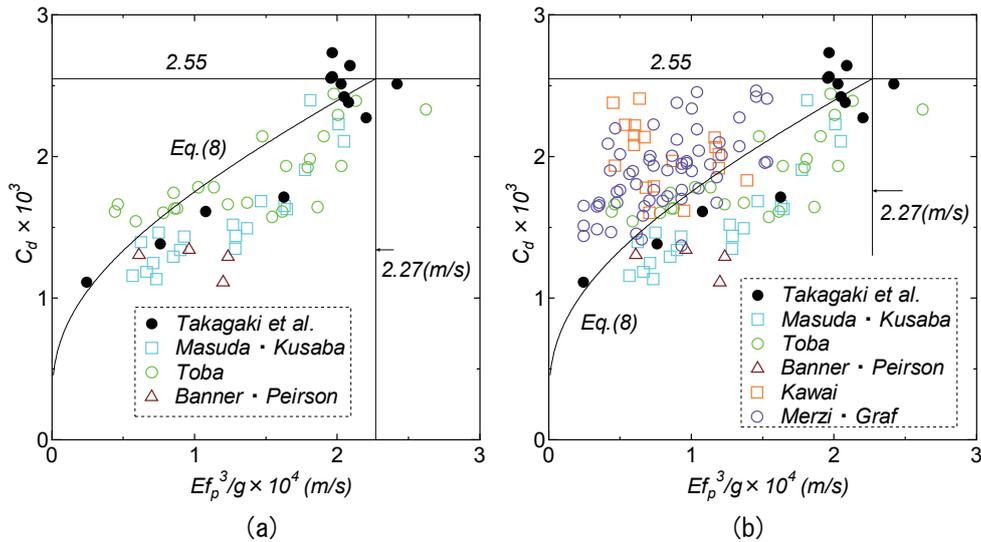


Fig. E3 C_d - Ef_p^3/g relation based on (a) either experiments or empirical equation, and (b) either observations added to experiments or empirical equation.

実験値はそれぞれの上限值である $Ef_p^3/g \times 10^4 = 2.27$, $C_d \times 10^3 = 2.55$ のあたりに集まってプロットされる特徴が見出される。その概略の挙動は式(8)によって代表されなくはないが、個々の実験値のばらつきが大きい。あるいは C_d の Ef_p^3/g に対する挙動は式(8)のように凸型の曲線ではなく、凹型の曲線で近似されるのかもしれない。なお、Fig. E3 の (b) に示すように、鈴木・鳥羽^[10]により収集された Kawai と Merzi・Graf による観測値のほとんどは式(8)より上側にプロットされることから、資料全体では C_d と Ef_p^3/g の相関関係が失われる。

Table E2 は本文と付録 B, C, D で記述した Ef_p^3/g , Toba 係数 $B(= (gH_s/u_*^2)(gT_s/u_*)^{-3/2})$, Toba 係数 $B_{10}(= (gH_s/U_{10}^2)(gT_s/U_{10})^{-3/2})$, U_{10} 表示から u_* 表示への変換で使用する U_{10}/u_* (A, B の各ケース) あるいは u_* 表示から U_{10} 表示への変換で使用する u_*/U_{10} (C, D の各ケース) の各式一覧を与える。

以上、ここでのまとめとして、次のことが言えよう。

- 1) グラフ上の値を読み取れるフリーソフトにより、Takagaki ら^[3]の実験値 (z_0 , U_{10} , C_d , u_* , Ef_p^3/g) をかなり高い精度で数値化することが可能になる。
- 2) Takagaki ら^[3]の実験結果 (z_0 , C_d , Ef_p^3/g) は U_{10} あるいは u_* とともに増加し、平均的にみて限界値に達するが、その限界風速 U_{10c} は Iwano ら^[4]による 33.6 m/s ($u_{*c} = 1.70$ m/s) のみならず 30 m/s ($u_{*c} = 1.52$ m/s) とみなすことも可能である。したがって、付録 B および付録 D で議論したように、5%程度の Toba 係数 B の増加も期待できる。
- 3) z_0 , C_d , Ef_p^3/g に関する Takagaki ら^[3]の実験値のみならず既往の実験値は U_{10} あるいは u_* との関係であまり隔たりを伴わずに整理される。
- 4) z_0 , C_d , Ef_p^3/g の各資料値は U_{10} よりむしろ u_* とばらつきの少ない関係で整理される。それらの挙動は Ef_p^3/g と U_{10} あるいは u_* の関係に関する Takagaki ら^[3]の実験式から導かれる z_0 や C_d に対し限界風速 U_{10c} あるいは u_{*c} を 2 通り変えた経験式により比較的良好に近似される。

Table E2 A list of empirical relation for any of Ef_p^3/g , Toba coefficient B , Toba coefficient B_{10} and U_{10}/u_* or u_*/U_{10} analytically expressed as a function of either U_{10} or u_* .

case	$\frac{Ef_p^3}{g}$ (m/s)	$B = \left(\frac{gH_s}{u_*^2}\right)\left(\frac{gT_s}{u_*}\right)^{-3/2}$	$B_{10} = \left(\frac{gH_s}{U_{10}^2}\right)\left(\frac{gT_s}{U_{10}}\right)^{-3/2}$	$\frac{U_{10}}{u_*}$ (A, B), $\frac{u_*}{U_{10}}$ (C, D)
A $U_{10c} = 33.6$ m/s	$\left[\begin{array}{l} 6.75 \times 10^{-6} U_{10} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 2.27 \times 10^{-4} ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \\ (= 6.75 \times 10^{-6} \times 33.6) \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 5.24 \times 10^{-2} u_*^{-0.1} ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 4.97 \times 10^{-2} \left(\frac{1.70}{u_*}\right)^{1/2} ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 1.12 \times 10^{-2} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 1.12 \times 10^{-2} \left(\frac{33.6}{U_{10}}\right)^{1/2} ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 22.0 u_*^{-0.2} ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 19.8 ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{array} \right.$
B $U_{10c} = 30$ m/s	$\left[\begin{array}{l} 7.57 \times 10^{-6} U_{10} ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 2.27 \times 10^{-4} ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \\ (= 7.57 \times 10^{-6} \times 30) \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 5.47 \times 10^{-2} u_*^{-0.0935} ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 5.26 \times 10^{-2} \left(\frac{1.52}{u_*}\right)^{1/2} ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 1.18 \times 10^{-2} ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 1.18 \times 10^{-2} \left(\frac{30}{U_{10}}\right)^{1/2} ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 21.4 u_*^{-0.187} ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 19.8 ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{array} \right.$
C $u_{*c} = 1.70$ m/s	$\left[\begin{array}{l} 1.335 \times 10^{-4} u_* ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 2.27 \times 10^{-4} ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \\ (= 1.335 \times 10^{-4} \times 1.70) \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 4.97 \times 10^{-2} ; u_* < 1.70 \text{ m/s} \\ 4.97 \times 10^{-2} \left(\frac{1.70}{u_*}\right)^{1/2} ; u_* \geq 1.70 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 6.63 \times 10^{-3} U_{10}^{0.149} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 1.12 \times 10^{-2} \left(\frac{33.6}{U_{10}}\right)^{1/2} ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 1.777 \times 10^{-2} U_{10}^{0.297} ; U_{10} < 33.6 \text{ m/s} \\ 0.0505 ; U_{10} \geq 33.6 \text{ m/s} \end{array} \right.$
D $u_{*c} = 1.52$ m/s	$\left[\begin{array}{l} 1.493 \times 10^{-4} u_* ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 2.27 \times 10^{-4} ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \\ (= 1.493 \times 10^{-4} \times 1.52) \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 5.26 \times 10^{-2} ; u_* < 1.52 \text{ m/s} \\ 5.26 \times 10^{-2} \left(\frac{1.52}{u_*}\right)^{1/2} ; u_* \geq 1.52 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 7.13 \times 10^{-3} U_{10}^{0.149} ; U_{10} < 30 \text{ m/s} \\ 1.18 \times 10^{-2} \left(\frac{30}{U_{10}}\right)^{1/2} ; U_{10} \geq 30 \text{ m/s} \end{array} \right.$	$\left[\begin{array}{l} 1.837 \times 10^{-2} U_{10}^{0.297} ; U_{10} < 30.0 \text{ m/s} \\ 0.0505 ; U_{10} \geq 30.0 \text{ m/s} \end{array} \right.$

F. Toba 係数の変動に対する考察（追加）

Ebuchi ら^[15]は日本周辺に配置されていた 4 基の気象庁外洋ブイによる 20 波平均の波高 H_m と周期 T_m , 10 分間平均 7.5 m 高度風速 $U_{7.5}$ や海水温・気温の約 3 年間にわたる観測資料を Toba 係数 B (0.062 ± 0.012 内), Richardson 数 Ri ($< \pm 0.02$), 粗度 Reynolds 数 Re (> 2.3) に課した制約条件のもとに解析し, z_0 則 (あるいは C_d 則) の変化に伴う B の頻度分布の変化や B の $H_s (= 1.60H_m)$ あるいは $U_{7.5}$ の小区間別平均値 B_m と標準偏差 B_σ の変化を調べている。Fig. F1 (a)と (b)は, Ebuchi ら^[15]の Buoy 21001 (仙台沖ブイ) に対する Fig. 10 (b)と (d)から区間別平均値 B_m と標準偏差 B_σ を読み取り再作成した結果を表す。Fig. F1 (a)では, B_m が H_s とともに増大して $H_{sm} = 4.25 \sim 6.75$ m で 0.062 よりやや小さいほぼ一定した値 (0.052~0.058, 資料数は少ない) をとり, さらに $H_{sm} > 7$ m では 0.060~0.061 と Toba 定数 0.062 にかなり近い値をとる挙動 (資料数がきわめて少なく, 標準偏差 B_σ は 0.012~0.013 と比較的大きい) を示しており, 低い H_s に対する 0.062 より小さい B をうねりの存在によるとし, 一方, $H_{sm} > 4$ m で B が 0.062 に近づく挙動を風との局所的平衡状態にある風波が卓越することによるとしている。

一方, Fig. F1 (b)では, B の平均値 B_m は $U_{7.5m}$ とともに増加し, $U_{7.5m} = 15 \sim 20$ m/s ではほぼ一定値に近い値 (0.048) をとったのち, $U_{7.5m} = 23$ m/s で約 0.06 に増加する。 $U_{7.5m} > 15$ m/s では資料数が急減するので, B_m の信頼性が損なわれる。しかし, この場合の特徴は平均値 B_m が $U_{7.5m}$ の増加によっても $U_{7.5m} < 20$ m/s では $B = 0.062$ の-20 %域にすら入らない点であり, H_{sm} の増加によって平均値 B_m が-20 %域に入る H_{sm} による整理の結果と特性を大いに異にする。これは Ebuchi ら^[15]の Fig. 10 (a)と (c)あるいはこれらを転載した Fig. F2 (a)と (b)にみるように, 少数の相対的に大きい値をもつ B 資料が $U_{7.5m}$ による整理では H_{sm} による整理に比べて小さい方に移動してプロットされ, この結果小さい B の値をもつ資料群に吸収されるため, $U_{7.5m}$ による整理では B_m が小さい値を与えることによる。

続いて, 本文での結果を追加検討する。Fig. F3 (a), (b), (c), (d), (e), (f)は既往の実験・観測値より得た (a) B と H_s , (c) B_{cal} と H_s , (e) B_{10} と H_s の各関係図および実験値のみを対象とした (b) B と H_s , (d) B_{cal} と H_s , (f) B_{10} と H_s の各関係図からなる。 B と B_{cal} に係わる (a), (b), (c), (d)の各図には Toba^[5]による $B_T = 0.062$, B_{10} に係わる (e), (f)の各図には $C_d = 1.6 \times 10^{-3}$ として Toba の 3/2 乗則から求めた式(A-12)に基づく $B_{10} = 0.0124$ を与える。実験・観測値あるいは実験値単独の場合によらず, H_s への

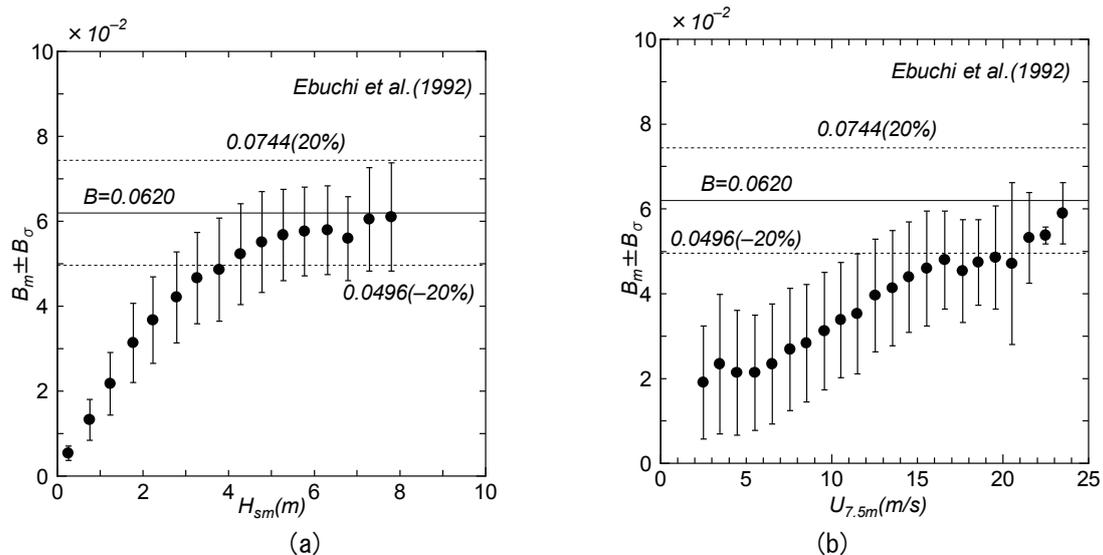


Fig. F1 (a) Relation between $B_m \pm B_\sigma$ and H_{sm} based on segment separation of H_s , (b) relation between $B_m \pm B_\sigma$ and $U_{7.5m}$ based on segment separation of $U_{7.5}$ (after Ebuchi et al.^[15]).

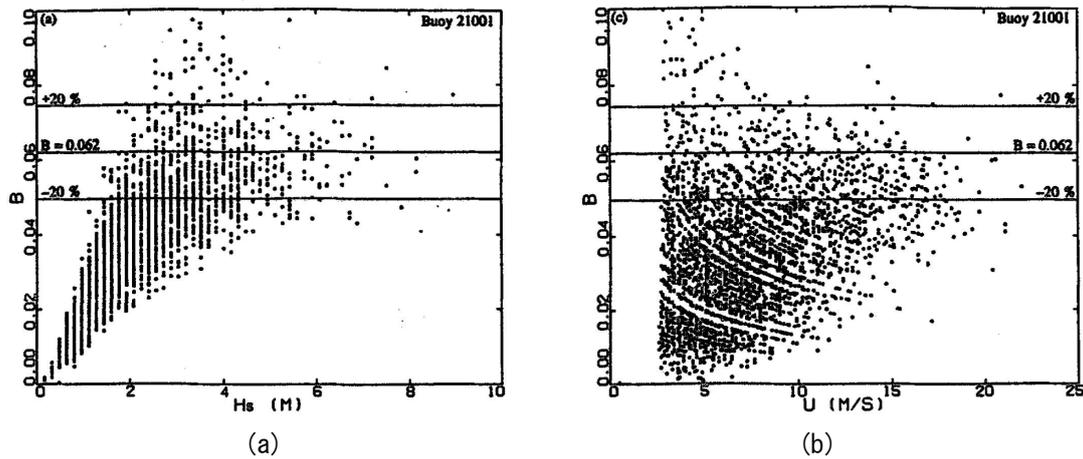


Fig. F2 (a) Relation between B and H_s and (b) relation between B and $U_{7.5}$ (after Ebuchi et al.^[15]).

系統的な依存性は B , B_{cal} , B_{10} のいずれについてもほとんどみられない。 B や B_{cal} は本文の Fig. 6 に示したように, H_s よりむしろ u_* あるいは u_{*cal} とともに若干減少傾向にあるようにみえる。

要するに, 既往の実験・観測値のケースでは, Ebuchi et al.^[15]の結果のように Toba 係数 B の区間別平均値 B_m が $U_{7.5}$ の小区間別分類の場合より H_s の小区間別分類の場合に大きい値をとる特徴はみられない。この一因は資料数が少なすぎる点にあるのかもしれない。さらに, 内湾・内海の観測資料より得られた Toba 係数 B と B_{10} の u_* (u_{*cal}), U_{10} , H_s に伴う挙動を調べる。 u_* , U_{10} の影響に関しては本文の Fig. 14, Fig. 17 および Fig. 18, Fig. 20 で検討したが, ここではもう少し整理した結果を H_s に伴う挙動とともに述べる。まず, Fig. F4 は B に対してそれぞれ(a)累積分布と(b)ヒストグラムを示す。 B は 0.0216~0.1029 の間で平均値 $B_m = 0.0586$ のまわりに分布する。標準偏差は $B_\sigma = 0.0094$ であるから, $B_m \pm B_\sigma$ の範囲も 0.0492~0.0680 となり広い。標準偏差 B_σ は平均値 B_m の 16%である。Toba 定数 $B_T = 0.062$ は累積分布の%値 $P = 65.5\%$ に位置する。

Fig. F5(a)は B と u_* の散布図を表す Fig. 14 と $B_m \pm B_\sigma$ と u_{*m} の関係を表す Fig. 17 を合体した図, (b)は B と H_s の散布図および H_s の 0.25 m ごとの小区間で得た $B_m \pm B_\sigma$ と H_{sm} の関係を示す。図中には Toba 定数 $B_T = 0.062$ や Takagaki ら^[9]による Toba 係数 B を表す線を与える。 B を u_* で整理すると, 区間別平均値 B_m は最初の値を除いて u_{*m} にあまり依存せず, Toba 定数 $B_T = 0.062$ より小さい値をとるのに対して, H_s で整理すると, B_m は最初の値から大きく上昇して, H_{sm} にあまり依存しないが $B_T = 0.062$ よりやや大きい値をとる。これは, Fig. F1 に与えた Ebuchi ら^[15]の挙動と同じである。

Table F1 は u_* を① $u_* \leq 0.3$ m/s, ② 0.3 m/s < $u_* < 0.6$ m/s, ③ $u_* \geq 0.6$ m/s の 3 区間と u_* の全区間 (H_s のみによる分類), H_s を① $H_s \leq 0.6$ m, ② 0.6 m < $H_s \leq 0.9$ m, ③ 0.9 m < $H_s < 1.2$ m, ④ $H_s \geq 1.2$ m の 4 区間と H_s の全区間 (u_* のみによる分類) に分割して得た B の資料値の各区間に属する個数 (N_s), 平均値 B_m , 標準偏差 B_σ および本文の Table 6 に与えた全資料に対するこれらの値の一覧を示す。きわめて少数の資料の区間では資料数のみを記載する。 u_* 区間のみの分類では B_m は u_* 区間にあまり依存せず, $B_m < 0.59$ であるのに対して, H_s 区間のみの分類では H_s の増加とともに B_m は大きくなり, $H_s > 0.9$ m の領域で B_m が Toba 定数 $B = 0.062$ を上まわる。ついで, u_* と H_s による小区間では, B_m は区間別 u_* が小さく区間別 H_s が大きいほど大きくなる。つまり, u_* が小さく H_s が大きいケース, すなわち B の値が相対的に大きいケースは風波の特性からみて出現数が限られることから, 全資料の平均値として Toba 定数 $B = 0.062$ より小さい値 (0.0586) が得られることになる。

ところで, 本文に記載した Mitsuyasu (1968) の式(27)と式(28)から求めた式(29)によれば, Toba

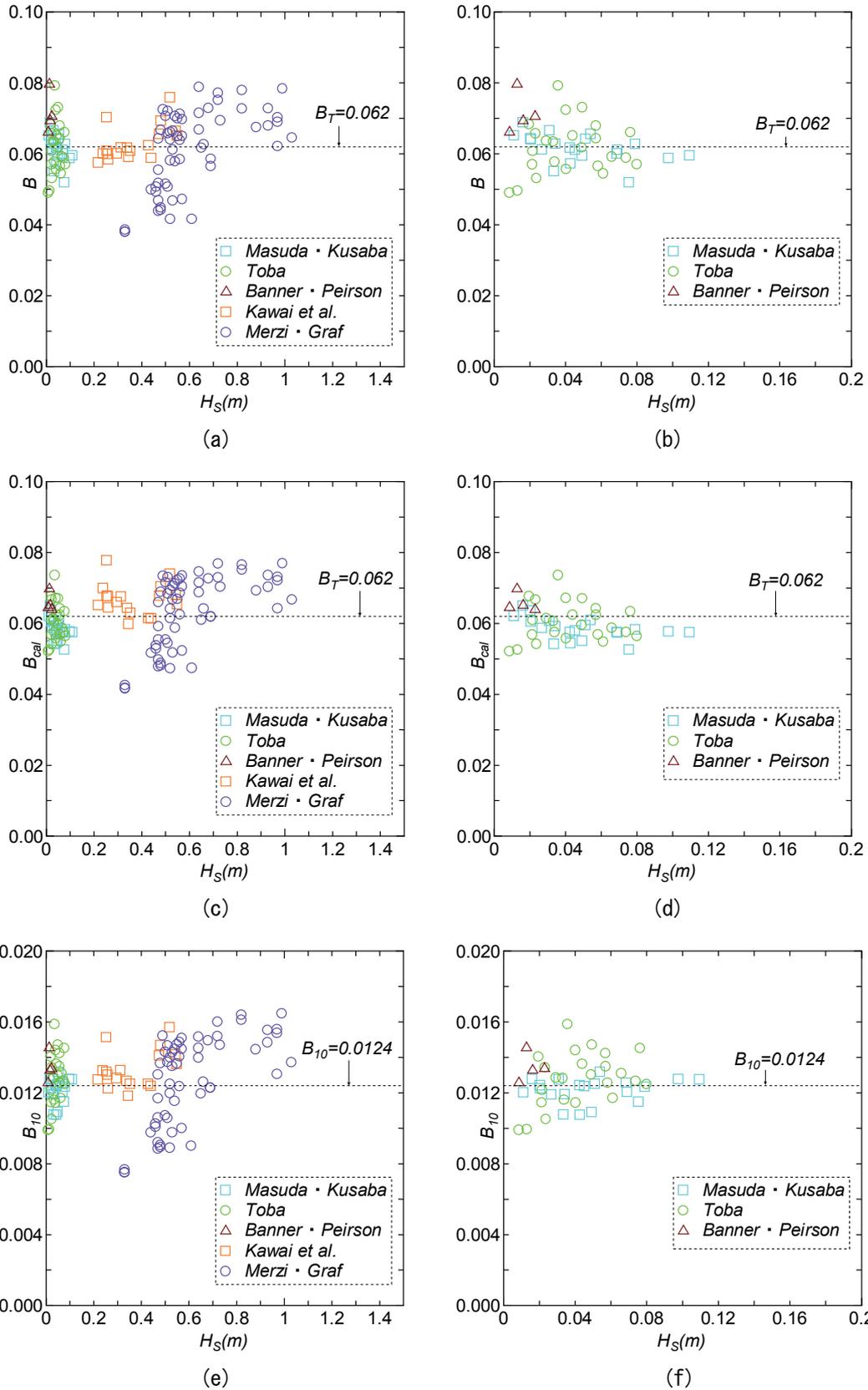


Fig. F3 Relation between (a) B and H_s , (c) B_{cal} and H_s , (e) B_{10} and H_s , based on experiments and observations, and relation between (b) B and H_s , (d) B_{cal} and H_s , (f) B_{10} and H_s , based on experiments.

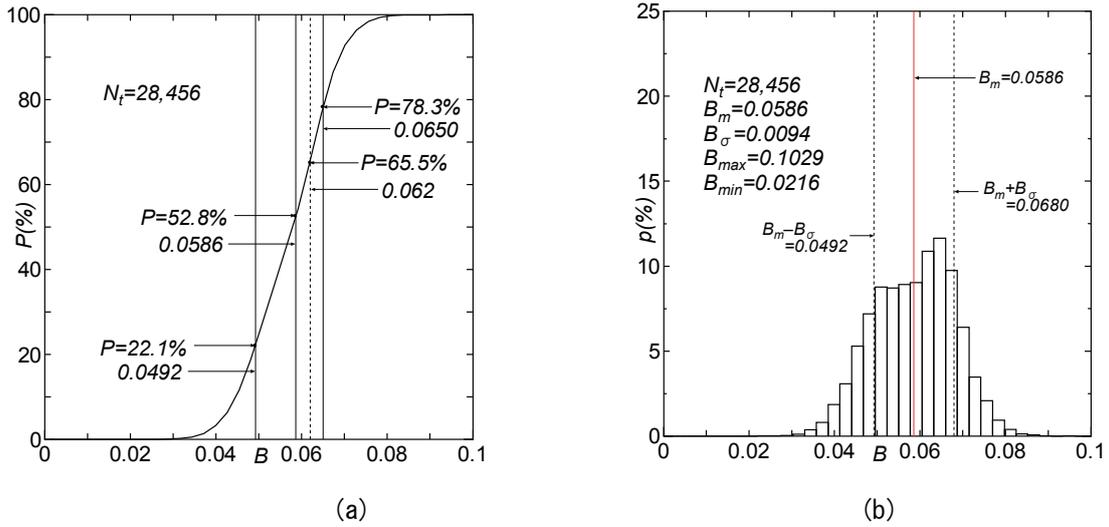


Fig. F4 (a) Cumulative distribution and (b) histogram of B .

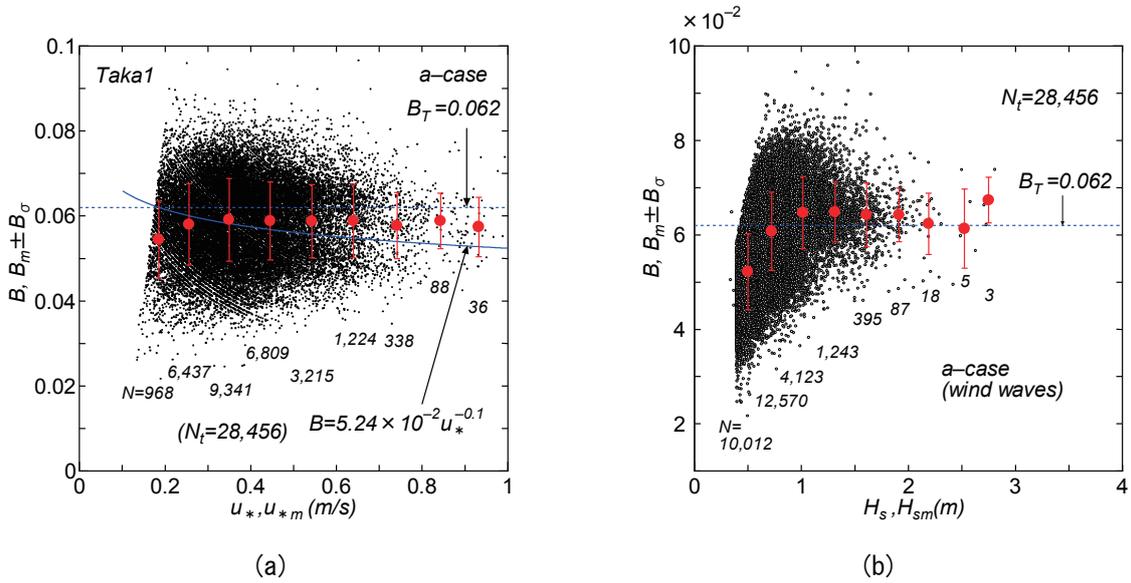


Fig. F5 (a) Scatter-plots between B and u_* supplemented with $B_m \pm B_\sigma - u_{*m}$ relation and (b) scatter-plots between B and H_s supplemented with $B_m \pm B_\sigma - H_{sm}$ relation.

係数は $B = 5.64 \times 10^{-2} F_*^{0.009}$ であり、無次元吹送距離への弱い依存性を示すが、式(27)から明らかなように、 F_* は gH_s/u_*^2 に変換できることから、 gH_s/u_*^2 の増加、すなわち H_s の増大や u_* の減少とともに Toba 係数 B が漸増する挙動を示す。これは上記の u_* と H_s に伴う変化傾向と定性的に整合する。

ついで、 B_{10} についてみる。Fig. F6(a), (b) はそれぞれ B_{10} の累積分布と頻度分布を示す。(a) 図には U_{10} 表示 ($C_d = 1.6 \times 10^{-3}$) に変換した Toba の 3/2 乗則における係数 $B_{10} = 0.0124$, $B_{10m} = 0.0116$, $B_{10m} + B_{10\sigma} = 0.0138$, $B_{10m} - B_{10\sigma} = 0.0094$ とこれらに対応する累積度数の%値 P を記す。 B_{10} は 0.0035 ~ 0.0246 とかなり広い範囲に分布し、標準偏差 $B_{10\sigma}$ も平均値 B_{10m} の約 20% に達する。平均値 B_{10m} は B_m と同様に Toba における係数 B_{10} よりやや小さい。

Fig. F7(a) は B_{10} と U_{10} の散布図および U_{10} の小区間に対応する B_{10} の平均値・標準偏差 $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$ と U_{10} の平均値 U_{10m} の関係、(b) は U_{10} に変えて H_s とした場合の同様の図を示す。図中には Takagaki ら^[3]

Table F1 A list of sample number N , mean B_m and standard deviation B_σ of B data classified by both u_* segments and H_s segments.

17 stations	$u_* \leq 0.3$ m/s	$0.3 < u_* < 0.6$ m/s	$u_* \geq 0.6$ m/s	H_s total
$H_s \leq 0.6$ m	$N_s = 5,703$ $B_m = 0.0550$ $B_\sigma = 0.0084$	$N_s = 4,848$ $B_m = 0.0496$ $B_\sigma = 0.0067$	$N_s = 5$	$N = 10,556$ $B_m = 0.0525$ $B_\sigma = 0.0081$
$0.6 < H_s \leq 0.9$ m	$N_s = 1,632$ $B_m = 0.0659$ $B_\sigma = 0.0080$	$N_s = 10,310$ $B_m = 0.0606$ $B_\sigma = 0.0079$	$N_s = 328$ $B_m = 0.0493$ $B_\sigma = 0.0049$	$N = 12,270$ $B_m = 0.0610$ $B_\sigma = 0.0083$
$0.9 < H_s < 1.2$ m	$N_s = 75$ $B_m = 0.0705$ $B_\sigma = 0.0092$	$N_s = 3,386$ $B_m = 0.0657$ $B_\sigma = 0.0067$	$N_s = 417$ $B_m = 0.0562$ $B_\sigma = 0.0079$	$N = 3,878$ $B_m = 0.0647$ $B_\sigma = 0.0076$
$H_s \geq 1.2$ m	$N_s = 3$	$N_s = 814$ $B_m = 0.0665$ $B_\sigma = 0.0064$	$N_s = 935$ $B_m = 0.0630$ $B_\sigma = 0.0059$	$N = 1,752$ $B_m = 0.0647$ $B_\sigma = 0.0065$
u_* total	$N = 7,413$ $B_m = 0.0575$ $B_\sigma = 0.0096$	$N = 19,358$ $B_m = 0.0590$ $B_\sigma = 0.0094$	$N = 1,685$ $B_m = 0.0586$ $B_\sigma = 0.0083$	$N_t = 28,456$ $B_m = 0.0586$ $B_\sigma = 0.0094$

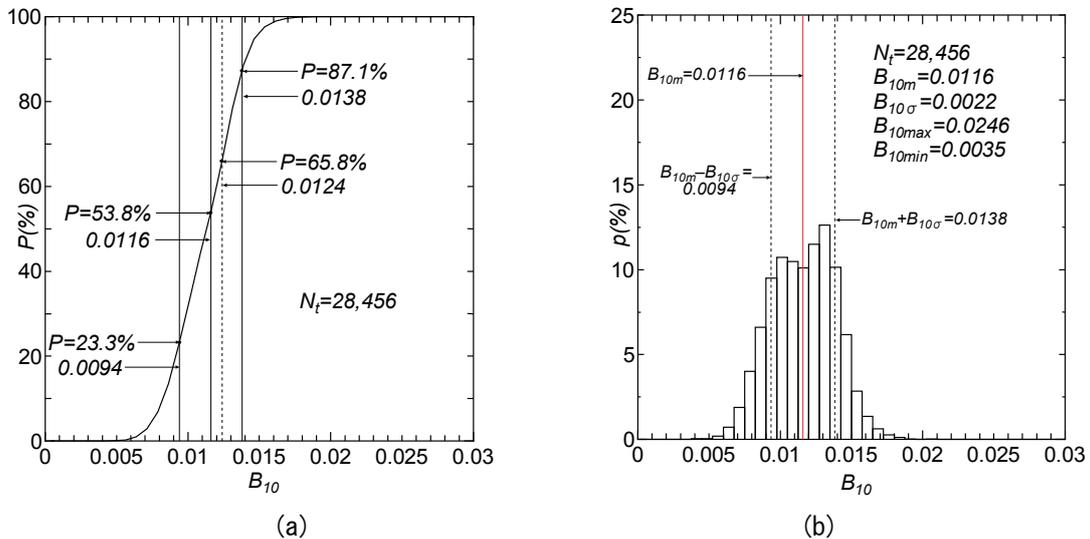


Fig. F6 (a) Cumulative distribution and (b) histogram of B_{10} .

に基づく $B_{10} = 0.0112$ (直線) および U_{10} 変換した Toba の $3/2$ 乗則における係数 $B_{10} = 0.0124$ (点線) を与える。 B_{10} は U_{10} に対して同程度の幅で分布し、平均値 B_{10m} も U_{10m} に関してごく緩やかな凸型の変化を示すのみで、あまり変化しない。一方、(b) 図では B_{10} は H_s とともに分布の幅を広げるが、 H_s の大きい場合には資料数の減少が目立つ。平均値 B_{10m} は H_{sm} の増大に伴って H_{sm} の短い区間で急増したのち、あまり変化しない値をとる。平均値 B_{10m} は U_{10m} の変化によってもあまり変わらないが、 H_{sm} の変化によって急増したのちほぼ一定の値を示す挙動は平均値 B_m の場合と同じである。

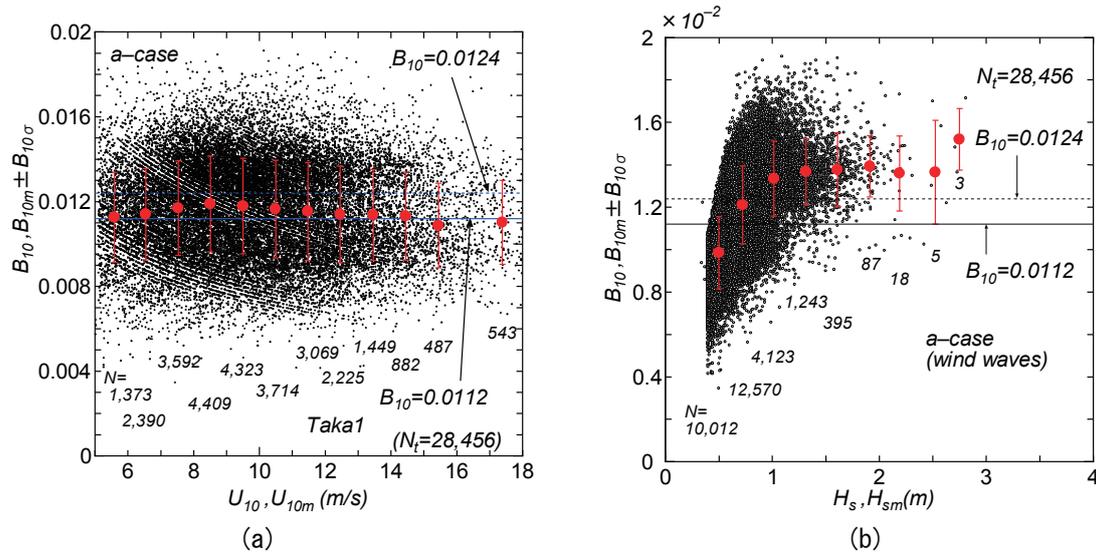


Fig. F7 (a) Scatter-plots between B_{10} and U_{10} supplemented with $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$ - U_{10m} relation and (b) scatter-plots between B_{10} and H_s supplemented with $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$ - H_{sm} relation.

Table F2 A list of sample number N , mean B_{10m} and standard deviation $B_{10\sigma}$ of B_{10} data classified by both U_{10} segments and H_s segments.

17 stations	$U_{10} \leq 7.5$ m/s	$7.5 < U_{10} < 15$ m/s	$U_{10} \geq 15$ m/s	H_s total
$H_s \leq 0.6$ m	$N_s = 3,969$ $B_{10m} = 0.0107$ $B_{10\sigma} = 0.0018$	$N_s = 6,563$ $B_{10m} = 0.0095$ $B_{10\sigma} = 0.0015$	$N_s = 24$ $B_{10m} = 0.0077$ $B_{10\sigma} = 0.0008$	$N = 10,556$ $B_{10m} = 0.0099$ $B_{10\sigma} = 0.0017$
$0.6 < H_s \leq 0.9$ m	$N_s = 1,368$ $B_{10m} = 0.0134$ $B_{10\sigma} = 0.0018$	$N_s = 10,550$ $B_{10m} = 0.0121$ $B_{10\sigma} = 0.0018$	$N_s = 353$ $B_{10m} = 0.0094$ $B_{10\sigma} = 0.0011$	$N = 12,271$ $B_{10m} = 0.0122$ $B_{10\sigma} = 0.0018$
$0.9 < H_s < 1.2$ m	$N_s = 74$ $B_{10m} = 0.0148$ $B_{10\sigma} = 0.0017$	$N_s = 3,562$ $B_{10m} = 0.0135$ $B_{10\sigma} = 0.0016$	$N_s = 242$ $B_{10m} = 0.0105$ $B_{10\sigma} = 0.0013$	$N = 3,878$ $B_{10m} = 0.0134$ $B_{10\sigma} = 0.0018$
$H_s \geq 1.2$ m	$N_s = 2$	$N_s = 1,338$ $B_{10m} = 0.0140$ $B_{10\sigma} = 0.0015$	$N_s = 411$ $B_{10m} = 0.0127$ $B_{10\sigma} = 0.0014$	$N = 1,751$ $B_{10m} = 0.0137$ $B_{10\sigma} = 0.0016$
U_{10} total	$N = 5,413$ $B_{10m} = 0.0114$ $B_{10\sigma} = 0.0022$	$N = 22,013$ $B_{10m} = 0.0117$ $B_{10\sigma} = 0.0023$	$N = 1,030$ $B_{10m} = 0.0110$ $B_{10\sigma} = 0.0020$	$N_t = 28,456$ $B_{10m} = 0.0116$ $B_{10\sigma} = 0.0022$

Table F2 は U_{10} を ① $U_{10} \leq 7.5$ m/s, ② 7.5 m/s $< U_{10} < 15.0$ m/s, ③ $U_{10} \geq 15.0$ m/s の 3 区間と U_{10} の全区間 (H_s のみによる分類), H_s を ① $H_s \leq 0.6$ m, ② $0.6 < H_s \leq 0.9$ m, ③ $0.9 < H_s < 1.2$ m, ④ $H_s \geq 1.2$ m の 4 区間と H_s の全区間 (U_{10} のみによる分類) に分割して得た B_{10} の資料値の各区間に属する個数 (N_s), 平均値 B_{10m} , 標準偏差 $B_{10\sigma}$ および本文の Table 6 に与えた全資料に対するこれらの値の一覧を示す。 B を u_* と H_s で整理した Table F1 の場合と同様に, B_{10} の平均値 B_{10m} は H_{sm} とともに増加してほぼ一定の値をとるのに対して, U_{10m} に対してはあまり変化を伴わず, $U_{10} \geq 15$ m/s ではむしろ減少する。 U_{10} お

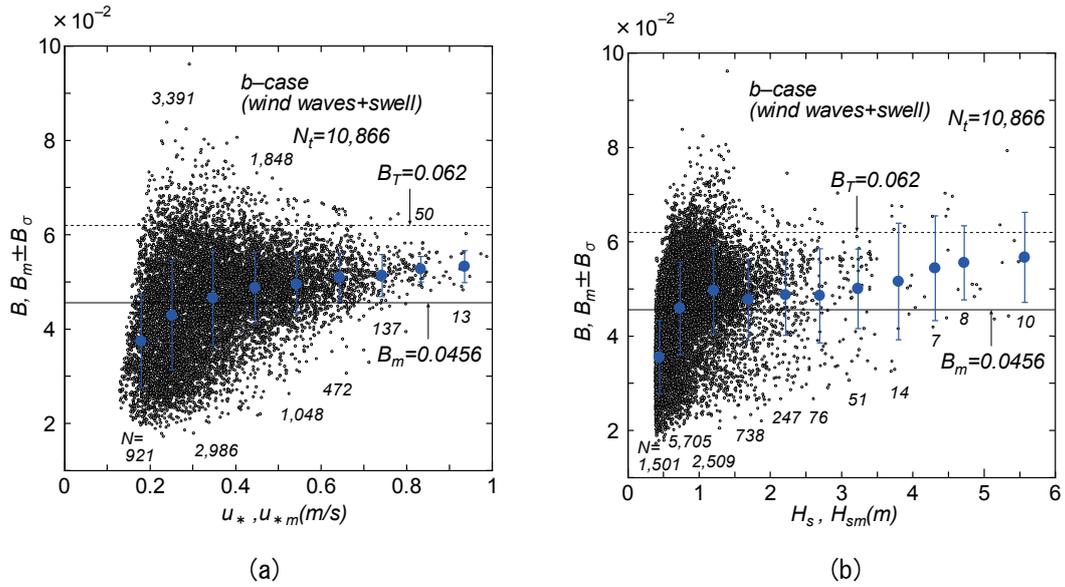


Fig. F8 (a) Scatter-plots between B and u_* supplemented with $B_m \pm B_\sigma$ - u_{*m} relation, (b) scatter-plots between B and H_s supplemented with $B_m \pm B_\sigma$ - H_{sm} relation.

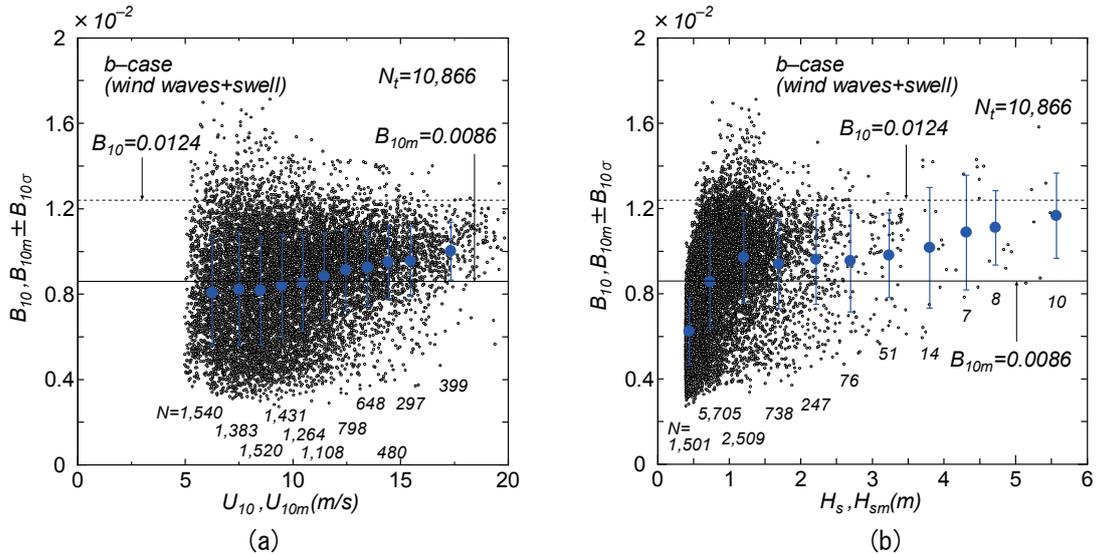


Fig. F9 (a) Scatter-plots between B_{10} and U_{10} supplemented with $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$ - U_{10m} relation and (b) scatter-plots between B_{10} and H_s supplemented with $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$ - H_{sm} relation.

よび H_s の小区間でみると, B_{10m} は H_s とともに増加傾向, U_{10} とともに減少傾向を与える。つまり, H_s が大きく U_{10} が小さいほど, B_{10m} は大きくなる。これは B_m の場合と同じである。しかし, Mitsuyasu^[11] の式に基づく本文中の式(32)では gF/U_{10}^2 を gH_s/U_{10}^2 に変換しても U_{10} へのより強い依存性をもつから, Toba 係数 B_{10} は H_s あるいは U_{10} とともに増加を示し, Table F2 における U_{10} の傾向と整合しない。この不整合の解消は今後取り組むべき課題である。

最後に, 本文で述べた b) 外洋波浪共存ケースに対する検討結果を示す。Fig. F8 (a) は B と u_* の散布図および u_* の小区間に属する B の平均値と標準偏差 $B_m \pm B_\sigma$ の u_* の平均値 u_{*m} に伴う変化, (b) は B と H_s についての結果を示す。同様に, Fig. F9 (a) は B_{10} と U_{10} の散布図および U_{10} の小区間に属する B_{10} の平均値と標準偏差 $B_{10m} \pm B_{10\sigma}$ の U_{10} の平均値 U_{10m} に伴う変化, (b) は B_{10} と H_s についての結果を表す。 B_m

Table F3 A list of sample number N , mean B_m and standard deviation B_σ of B data classified by both u_* segments and H_s segments(wind waves +swell case).

wind waves + swell 5 stations	$u_* \leq 0.3$ m/s	$0.3 < u_* < 0.6$ m/s	$u_* \geq 0.6$ m/s	H_s total
$H_s \leq 0.75$ m	$N_s = 3,113$ $B_m = 0.0398$ $B_\sigma = 0.0102$	$N_s = 1,558$ $B_m = 0.0437$ $B_\sigma = 0.0087$	$N_s = 6$	$N = 4,677$ $B_m = 0.0411$ $B_\sigma = 0.0099$
$0.75 < H_s \leq 1.25$ m	$N_s = 955$ $B_m = 0.0478$ $B_\sigma = 0.0131$	$N_s = 3,126$ $B_m = 0.0493$ $B_\sigma = 0.0078$	$N_s = 68$ $B_m = 0.0506$ $B_\sigma = 0.0055$	$N = 4,149$ $B_m = 0.0490$ $B_\sigma = 0.0093$
$1.25 < H_s < 1.75$ m	$N_s = 139$ $B_m = 0.0401$ $B_\sigma = 0.0109$	$N_s = 883$ $B_m = 0.0497$ $B_\sigma = 0.0093$	$N_s = 354$ $B_m = 0.0507$ $B_\sigma = 0.0043$	$N = 1,376$ $B_m = 0.0490$ $B_\sigma = 0.0090$
$H_s \geq 1.75$ m	$N_s = 108$ $B_m = 0.0442$ $B_\sigma = 0.0097$	$N_s = 312$ $B_m = 0.0474$ $B_\sigma = 0.0103$	$N_s = 244$ $B_m = 0.0521$ $B_\sigma = 0.0053$	$N = 664$ $B_m = 0.0486$ $B_\sigma = 0.0092$
u_* total	$N = 4,315$ $B_m = 0.0417$ $B_\sigma = 0.0114$	$N = 5,879$ $B_m = 0.0478$ $B_\sigma = 0.0088$	$N = 672$ $B_m = 0.0512$ $B_\sigma = 0.0049$	$N_t = 10,866$ $B_m = 0.0456$ $B_\sigma = 0.0103$

や B_{10m} がそれぞれ u_{*m} や U_{10m} とともに緩やかに増加して変化を小さくする挙動および B_m や B_{10m} が H_{sm} とともに急増したのち、ほぼ一定の値をとる挙動を与える。後者の変化傾向は a)内湾・内海波浪ケースの場合と類似するが、前者、すなわち u_{*m} や U_{10m} に係わる挙動は b)外洋波浪共存ケースで多少の増加傾向を与えるという意味で、a)内湾・内海波浪ケースと特性をやや異にする。

Table F3 は Table F1 と同様の表を示す。ただし、外洋性波浪を考慮して、 H_s の分割区間を① $H_s \leq 0.75$ m, ② $0.75 \text{ m} < H_s \leq 1.25$ m, ③ $1.25 \text{ m} < H_s < 1.75$ m, ④ $H_s \geq 1.75$ m の4つとしている。Fig. F8(a)と(b)でみたように、 B_m は H_{sm} とともに急増してほぼ一定値をとり、 u_{*m} についてもその増大とともに急増したのち緩やかな増加を示す。 u_{*m} や H_{sm} の小区間別値についても、 u_{*m} に対して同様の傾向をとるが、 H_{sm} についても急増と緩やかな増加傾向を示すものの、とくに $u_* \leq 0.3$ m/s の条件では H_s に関する変化傾向が一様でない。b)外洋波浪共存ケースでは、 B_m は u_* とともに増加傾向を与えて、a)内湾・内海波浪ケースと逆の特性を示す。つまり、 u_* や H_s が増加するほど B_m が大きくなるが、その場合でも Toba 定数 $B = 0.062$ よりかなり小さい。b)外洋波浪共存ケースにおいても9つの制約条件の適用によってできるだけ風波成分が卓越する資料を抽出するように試みているが、依然として有意なうねり成分が低い Toba 係数 B を生じるように作用しているのかもしれない。

以上の考察の結果をまとめると、つぎのようである。

1)a)内湾・内海波浪ケースにおいては、Toba 係数 B の H_s や u_* の小区間別平均値は H_s とともに急増後、緩やかな増加傾向に遷移するが、逆に u_* とともに減少する。これは B を B_{10} 、 u_* を U_{10} とする場合でも同様である。 B の大きさは H_s が大きく u_* が小さい領域で Toba 定数 $B_T = 0.062$ を上まわりますが、資料数が多いこれ以外の H_s と u_* の領域では0.062を下回る資料が多くなることから、全資料についての B の平均値は0.0586と0.062より小さくなる。 B_{10} についても H_s と U_{10} に関して同様のことが言える。こうした H_s と u_* の変化に伴う B の挙動は Mitsuyasu^[11]に基づく経験式による B の挙動と整合するが、 H_s と U_{10} に

伴う B_{10} の変化に関しては、これがあてはまらない。

2)b)外洋波浪共存ケースでは、 B は H_s について a)内湾・内海波浪ケースと同様の傾向をもつが、 u_* に対しては逆の挙動を示す。また、 B の値は Toba 定数 $B = 0.062$ の80%程度と小さい。 U_{10} を用いる B_{10} の場合も同様である。いずれにしろ、b)外洋波浪共存ケースにおける B や B_{10} が a)内湾・内海波浪ケースの場合より低い特徴は、うねりの影響が有意な大きさをもつことによると推測される。

以上、執筆を重ねながら思いついた研究の過程を順次記述したため、わかりにくい結果となってしまった。今後、結果の整理に努めるとともに、残された最大の課題である超強風速に対する Toba 係数の挙動を衛星データの解析のみならず最先端の波浪推算モデルの適用によって検討する必要がある。

G. Kahma・Calkoen^[18]の経験式による検討

欧米では fetch law として Kahma・Calkoen^[18]による経験式が引用されることが多い。これは多様な海域における現地観測資料を再編集して提案されており、 $F_* = 5 \times 10^4 \sim 4 \times 10^6$ に対して次式で表される。

$$\frac{gE}{u_*^4} = 6.5 \times 10^{-4} F_*^{0.9} \quad (G-1)$$

$$\frac{u_* f_p}{g} = 0.49 F_*^{-0.27} \quad (G-2)$$

したがって

$$\frac{gH}{u_*^2} = 0.102 F_*^{0.45} \quad (G-3)$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = \frac{1}{0.49} F_*^{0.27} = 2.04(08) F_*^{0.27} \quad (G-4)$$

ここで、経験式 $T_p = 1.05T$ を利用すると、式(G-4)は

$$\frac{gT}{u_*} = \frac{1}{1.05 \times 0.49} F_*^{0.27} = 1.9436 F_*^{0.27} \quad (G-5)$$

になり、Toba 定数 B_T 式は次式で表される。

$$B_T = \left(\frac{gH}{u_*^2} \right) \left(\frac{gT}{u_*} \right)^{-3/2} = 0.102(1.05 \times 0.49)^{3/2} F_*^{0.045} = 3.76 \times 10^{-2} F_*^{0.045} \quad (G-6)$$

すなわち、Kahma・Calkoen^[18]の経験式 ($F_* = 5 \times 10^4 \sim 4 \times 10^6$) に基づく Toba 係数 B_T は定数というより $F_*^{0.045}$ に比例する。 $F_*^{0.045}$ 項は Mitsuyasu^[11]の経験式に基づいて導かれた B_T 式

$$B_T = 5.64 \times 10^{-2} F_*^{0.009} ; F_* = 1.6 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6 \quad (G-7)$$

におけるべき乗項 $F_*^{0.009}$ の2乗倍に相当しており、より強い F_* への依存性を表す。 F_* に関する両者の重複部分でみると、

$$\begin{cases} B_{TKC} = 0.0612, B_{TM} = 0.0622 ; F_* = 5 \times 10^4 \\ B_{TKC} = 0.0722, B_{TM} = 0.0643 ; F_* = 2 \times 10^6 \end{cases} \quad (G-8)$$

であるから、 $F_* = 2 \times 10^6$ では Kahma・Calkoen 式に基づく値 (B_{TKC}) が Mitsuyasu 式に基づく値 (B_{TM}) より絶対値、増大率ともに大きい。いずれにしろ Kahma・Calkoen の経験式によれば、Toba 定数 $B_T = 0.062$ という関係は Mitsuyasu の経験式の場合より一層成立しない。また、 T_p をそのまま使用する場合の係数 B_{Tp} は

$$B_{Tp} = \left(\frac{gH}{u_*^2} \right) \left(\frac{gT_p}{u_*} \right)^{-3/2} = 3.50 \times 10^{-2} F_*^{0.045} \quad (G-9)$$

で表されるから、 B_T より7%小さい。