

成分波の発達率及び水面粗度に及ぼす 温度成層の影響に関する研究

布 目 彰 一*・加 藤 始**・信 岡 尚 道***

1. 緒 言

現在の波浪推算で十分に取り入れられてない要因の一つに温度成層の効果がある。加藤ら(2000)は, Mitsuyasu & Honda (1982) にならって規則波の上に風をかける実験を行い, 不安定成層時と中立成層時の成分波の発達率がほぼ同じ式で表されることを報告した。このことから中立時の式が温度成層下でも適用できるのではないかと期待されたが, 実験が行われていない安定成層側についても中立時の式が成り立つかという課題が残された。水面粗度 z_0 は波浪推算で摩擦速度 u_* を計算するための重要なパラメータであるが, 現在のところ波への依存性についての議論が決着していない。本研究では加藤らと同様の方法で, 中立・安定成層での実験を行い, 温度成層が波の時間的発達率 β , 水面粗度 z_0 に与える影響について検討すること, また, z_0 及び u_* と水面の波との関係を検討することを目的とする。

2. 実験方法

Mitsuyasu & Honda (1982) が示したように, 波形勾配が比較的大きい規則波の上に風をかけると, 風波成分の発達は抑えられ, 規則波成分が増大する(図-1 参照)。本研究ではこれを利用して温度成層の下での成分波の発達率を求める。実験は油圧制御フラップ型造波装置付きの小型風洞水槽(有効吹送距離 9.0 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.8 m)を用いて行った。

実験は表-1 に示す 5 ケースの規則波を使用し, 風速は送風機の回転数で制御した 4 ケース(吹送距離 $F=5.5$ m の点での最大風速が $U_r=4.2, 5.6, 7.1, 8.5$ m/s), ただし周期 $T=1.3$ s の時は風速が 3 ケース(4.2, 5.6, 7.1 m/s) の合計 19 ケースで, 規則波と風を同時に起こして測定をした。実際には, 約 6 % の反射波の影響を除くため, 波高計を 5 cm~10 cm 間隔で順次移動させてその点の前後 13 点で, $\Delta t=1/50$ s, $N=8200$ で測定を行った。温度成層は, 水路に氷と温風機を用いて風温 T_a と水

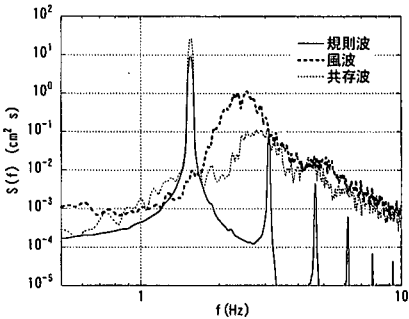


図-1 無風時の規則波と共存波の風による発達

表-1 規則波の周期・波高

ケース	G20	G25	G30	G35	G40
周期(s)	0.97	0.78	0.65	0.55	1.3
波高(cm)	1.59	1.92	2.17	2.32	2.93
(H/L) ₀	0.01	0.02	0.03	0.05	0.01

温 T_w の温度差 $\Delta T (=T_a - T_w)$ を作って発生させ, 測定は中立成層・安定成層ともに表-1 に示すケース (G20, G25, G30, G35, G40 と表示する) で行った。波高測定の際には水質に十分注意を払い, 各ケースごとに表層水をオーバーフローさせた。風速分布の測定には 3 mm ϕ のピトー管と差圧計を用い, 波高の測定には容量式波高計を使用した。

3. 発達率の計算方法

3.1 規則波の減衰係数

水槽で起こした波は, 水の粘性, 壁面の摩擦等によって減衰する。図-2 は安定成層のケースにおける無風時の各点の規則波のエネルギー $E (= \frac{1}{2} \rho g \eta^2)$, η : 水面変位) の測定値を示している。この大部分の場合, 表面皮膜の影響を少なくするため表面波は生じないようにごく弱い風をかけながら測定を行った。また各点はその前後 13 点の測定値をもとに極大・極小を含む 1 群を選び, その平均値として求めたものである。各ケースでの減衰係数 Δ は,

$$E = E_0 \exp(-\Delta x) \dots\dots\dots (1)$$

* 学生会員 茨城大学理工学研究科博士前期課程
** 正 会 員 工博 茨城大学名誉教授
*** 正 会 員 工博 茨城大学助手 工学部都市システム工学科

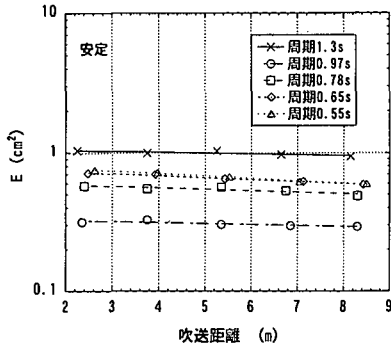


図-2 無風時の規則波の減衰

表-2 減衰係数 Δ の測定値と理論値

	ケース	周期 (s)	水温 (°C)	実験値	理論値
中立	G20	0.97	20.9	0.0148	0.0150
	G25	0.77	21.8	0.0200	0.0220
	G30	0.64	21.8	0.0315	0.0297
	G35	0.55	21.9	0.0377	0.0380
	G40	1.30	10.3	0.0140	0.0109
安定	G20	0.97	12.5	0.0168	0.0167
	G25	0.77	13.0	0.0247	0.0239
	G30	0.64	14.1	0.0327	0.0322
	G35	0.55	15.0	0.0406	0.0414
	G40	1.30	11.0	0.0150	0.0109

の式で最小自乗法を適用し、図に示した直線から求めた。ここに x は吹送距離である。一方、Mitsuyasu & Honda (1982) は Δ の理論値が次のように表されることを示している。

$$\Delta = \Delta_s + \Delta_b \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta_s = 16\nu k^2 \frac{\omega}{g} \frac{\cosh^2 kd}{\sinh 2kd + 2kd} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta_b = \frac{4k}{b} \left(\frac{\nu}{2\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{kb + \sinh 2kd}{\sinh 2kd + 2kd} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 k は波数、 d は水深、 ω は角周波数、 b は水路幅、 ν は水の動粘性係数である。表-2 に Δ の実測値と理論値を示す。動粘性係数 ν は水温に依存して変わるので、 Δ の理論値は実験時の水温に対して計算してあるが、実測値と理論値はかなり良い一致を示している。

3.2 規則波の発達率

規則波成分のエネルギ- E は、スペクトルのピーク付近 (上は風波成分との間の極小値まで) の値を積分して求めた。高次のピークが風波成分と重なる場合それを見無視したが、その影響は 1% 以下である。規則波の見かけの空間的発達率 α' は次式で求める。

$$E = E_0 \exp \alpha' x \dots\dots\dots (5)$$

規則波の正味の発達率 α は見かけの発達率 α' に波の減衰係数 Δ を加えることにより次式から求められる。

$$\alpha = \alpha' + \Delta \dots\dots\dots (6)$$

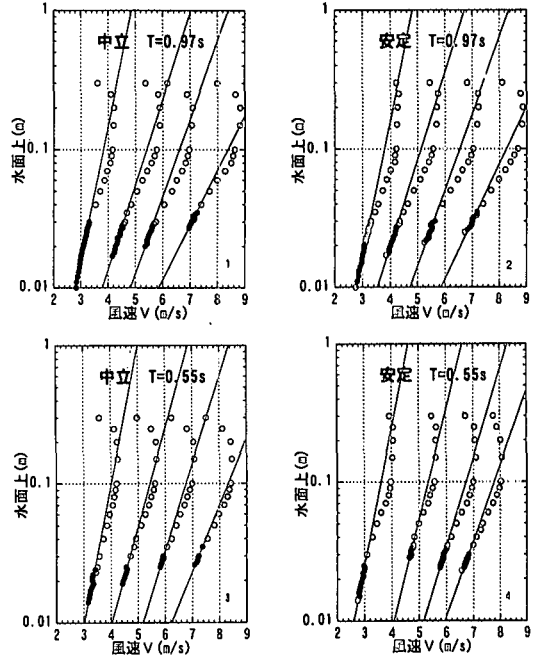


図-3 水面上の風速分布の例

4. 風速分布からの摩擦速度と水面粗度の求め方

本研究では発達率の表示に使う風の摩擦速度 u_* を測定するために、 $F=5.5\text{ m}$ の点で水面上の風速分布を測定した。図-3 にその一部を示しているが、その水面付近 (黒丸の点) に対数法則

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} = 5.75 u_* \log \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots (7)$$

を適用して u_* 、 z_0 を求めた。ここに κ はカルマン定数 ($=0.40$)、 z_0 は水面粗度である。

5. 摩擦速度と水面粗度の測定結果

摩擦速度 u_* は測定した風速分布から上述の方法に従って求めた。加藤・長山ら (1997) によると摩擦速度は、中立成層に比べて安定成層で小さく、不安定成層で大きくなることが報告されている。図-4 は、本研究で測定した摩擦速度 u_* を最大風速 U_r の比で示したものである。この結果より、 u_*/U_r の比で表すと不安定・中立・安定での差が小さくなるが、同じ送風機の回転数に対しては、中立成層に対して不安定成層の方が大きく、安定成層では小さくなることを確認することができた。

水面粗度と摩擦速度の関係は、Charnock の式 (8) が良く知られている。

$$z_0 = \alpha u_*^2 / g \dots\dots\dots (8)$$

Wu (1980) は、 $\alpha=0.0185$ としており、現地のデータに

良く一致している。図-5は本研究での z_0 をWuの式と比較する形になっている。図-5の近似曲線は、Charnockの式で係数 a を最小自乗法で求めたものである。この結果より、風洞水槽の z_0 は現地の z_0 より小さくなる傾向が見られる。また、Charnockの式による近似曲線は安定成層・中立成層・不安定成層で異なり、 z_0 は中立に比べ安定成層ではやや小さく、不安定成層ではやや大きくなる傾向が見られる。

通常 z_0 は海面状態に依存すると考えられているが、 u_* 、 z_0 を波高(共存波の $\overline{\eta^2}$)に対してプロットした図-6からは良い相関が見られなかった。一方、古い論文でFrancis (1954) は水面に働く風のせん断応力 τ_0 は、大き

な波の上でゆっくり動く小さなrippleの形状抵抗による寄与が大きいのではないかと指摘している。そこで、規則波成分の上に乗った風波成分に着目し、図-7のように逆FFT法を用いて規則波成分を除き、風波成分の $\overline{\eta^2}$ を求めてみた。

このようにして求めた風波成分の $\overline{\eta^2}$ を吹送距離ごとにプロットしたものが図-8である(G の値は表-1参照)。 u_* の測定点 $F=5.5\text{ m}$ までの風波成分 $\overline{\eta^2}$ の代表値(一般には $F=4.0\text{ m}$ の値)と u_* 、 z_0 を比較したのが図-9である。ただし、風速が $7.1, 8.5\text{ m/s}$ のケースでは波

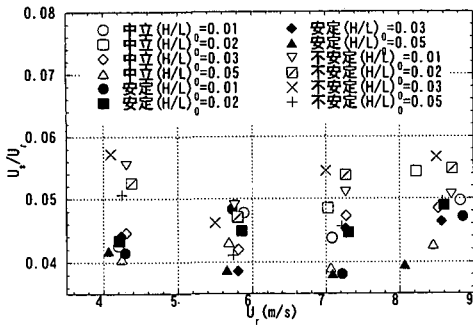


図-4 u_* と最大風速 U_r の関係

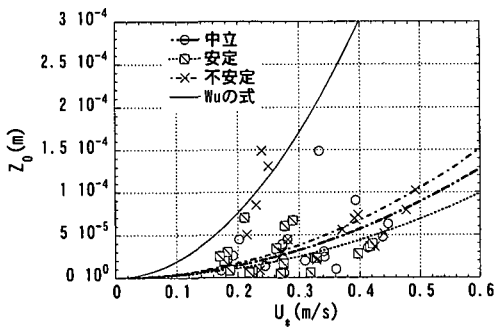


図-5 水面粗度 z_0 と摩擦速度 u_* の関係

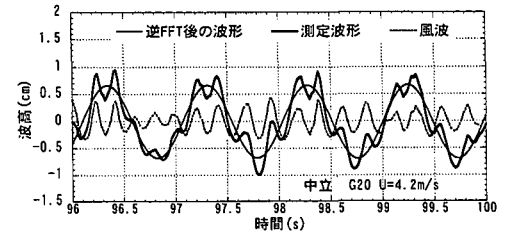


図-7 逆FFT法による波形の分離

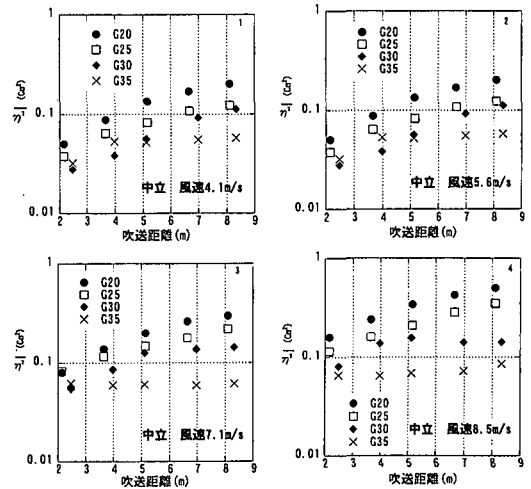


図-8 吹送距離と風速成分の $\overline{\eta^2}$ の関係

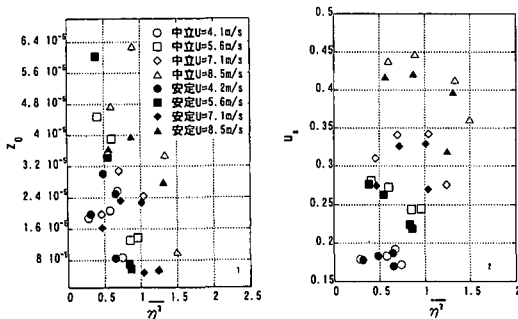


図-6 共存波の $\overline{\eta^2}$ と z_0 、 u_* の関係

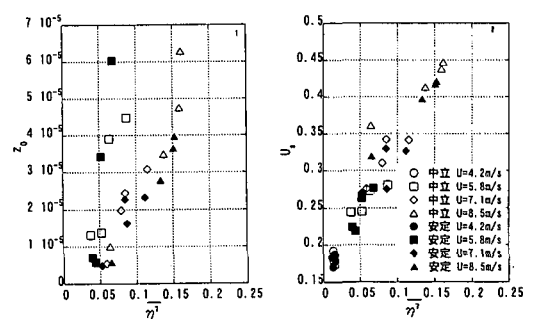


図-9 風波成分の $\overline{\eta^2}$ と z_0 、 u_* の関係

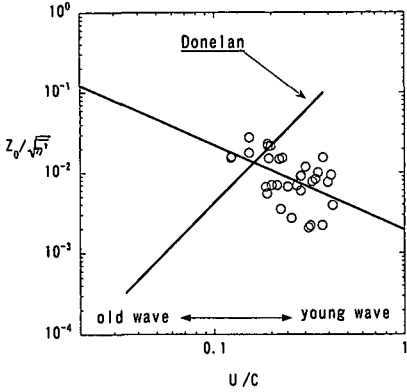


図-10 Donelan 他との z_0 の比較

形勾配が小さいと風波成分の $\overline{\eta^2}$ が大きく変化している
ので、G20 の $\overline{\eta^2}$ は $F=2.5$ m の点の値を使用している。
図-9 より、 u_* 、 z_0 とも風波成分の $\overline{\eta^2}$ と相関性が大きい
ことが分かる。この結果は、 u_* や水面粗度 z_0 に対して波
の高周波成分の寄与が重要なことを示していると言え
る。

Donelan 他 (1993) は z_0 を $\sqrt{\overline{\eta^2}}$ で、 u_* を波速 C で無次
元化した関係を示し、海洋波の young wave は、old wave
より荒いことを示した (図-10)。一方、Toba & Iida
(1990) は現地と実験室の両方のデータを使って old
wave は young wave より荒いという結果を示しており、
この事についてはその後も論争が続いている (Jones &
Toba, 1995 ; Donelan 他, 1995)。本研究の z_0 を Donelan
他と同様に無次元化して示すと図-10 のようになり、 z_0
の傾向は Toba 他の結果と近いが、この点については温
度成層の影響も含めてさらに検討の余地がある。

6. 発達率についての実験結果

図-11 には式 (6) から得られた正味の発達率 α と風
と水の温度差 ΔT の関係を示している。図中の直線は波
と風の条件が対応するケースを結んでおり、この図は今
回の実験における ΔT の範囲も示している。なお温度差
 ΔT が風の温度勾配の良い指標になることは、既に加
藤・長山ら (1997) が示している。

図-12 は求めた空間的発達率 α を加藤ら (2000) と同
様に規則波の波形勾配ごとに、中立の場合は白抜き記号
($\square \diamond \triangle$)、安定のケースは黒塗り ($\bullet \blacksquare \blacktriangle$) で u_* に
対してプロットしたものである。この図から、波形勾配
が大きいほど α は大きくなることと、同じ波形勾配なら
 u_* に対する α の値は中立成層も安定成層も不安定成層
もほとんど同じに表されることが分かった。

波浪推算モデルで使われる時間的発達率 β は、空間的
発達率 α から次式で計算される。

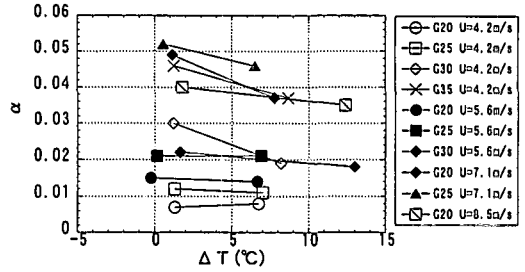


図-11 温度差 ΔT と発達率 α の関係

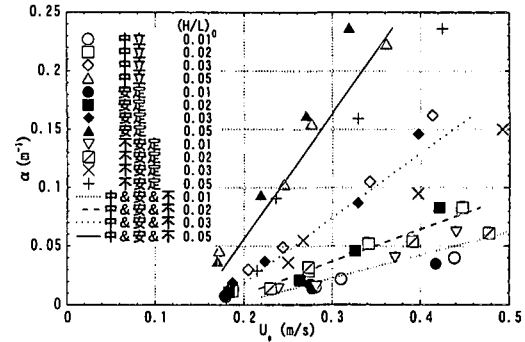


図-12 発達率 α に及ぼす波形勾配と u_* の関係

$$\beta = C_0 \alpha \dots\dots\dots (9)$$

ここに C_0 は線形理論から求めた規則波の群速度であ
る。Mitsuyasu & Honda (1982) にならって、実験から
求めた成分波の発達率 β を無次元発達率 β/f と無次元摩
擦速度 u_*/C の関係で示したのが図-13 である。ここで
 f は規則波の基本周波数、 C は対応する規則波の位相速
度である。図中には Mitsuyasu らが求めた関係式と本研
究の測定結果から求めた回帰式も直線で示しているが、
それらは式 (10)~(13) の通りである。なお、不安定の
関係は加藤・鈴木ら (2000) の結果である。

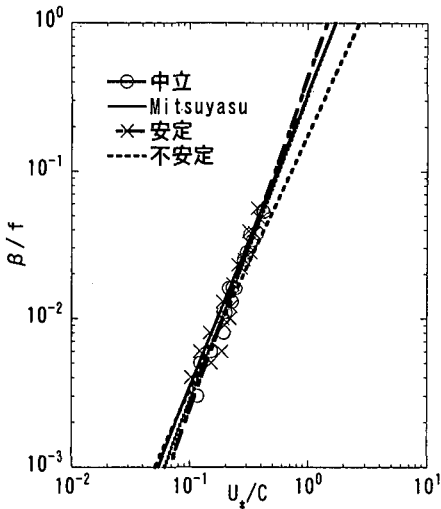
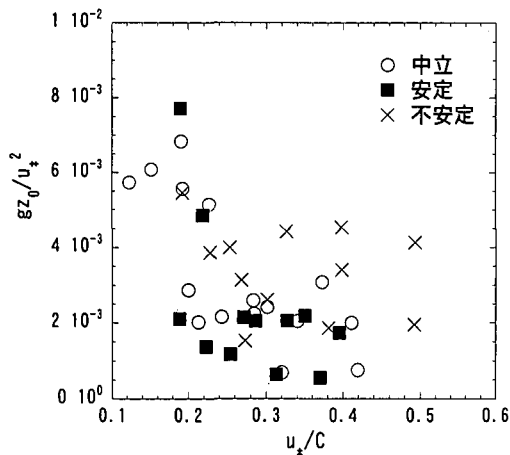
Mitsuyasu
$$\frac{\beta}{f} = 0.34 \left(\frac{u_*}{C} \right)^2 \dots\dots\dots (10)$$

中立成層
$$\frac{\beta}{f} = 0.330 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{2.078} \dots\dots\dots (11)$$

安定成層
$$\frac{\beta}{f} = 0.430 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{2.252} \dots\dots\dots (12)$$

不安定成層
$$\frac{\beta}{f} = 0.178 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{1.74} \dots\dots\dots (13)$$

図-13 及び式 (10)~(13) より次のことが確認できる。
中立成層での測定結果は、Mitsuyasu らの結果とほぼ等
しくなる。安定成層の式 (12) の場合には、中立時の式
と若干異なるが、実際の測定点で見ると中立時と安定成
層の点のばらつきに異なる傾向は見られない。不安定成
層の式 (13) に関しても加藤・鈴木ら (2000) により同
様の結果が報告されている。このことは、図-13 で α の

図-13 無次元発達率 β/f と無次元摩擦速度 u_*/C の関係図-14 無次元粗度 gz_0/u_*

値が近似的に中立・安定・不安定に関係なく u_* で表せたので当然の結果かもしれない。これらの結果から、発達率の式は温度成層の下でも中立時とほぼ同じになることが分かった。

次に z_0 に及ぼす温度成層の影響を無次元形でプロットしたのが図-14 である。この図のような無次元の形で表しても、風速がもっとも小さい場合を除いて、 gz_0/u_* は不安定 > 中立 > 安定となる傾向が見られる。

7. 結 論

風洞水槽を使って温度成層の下での規則波の発達率を求め、Mitsuyasu & Honda (1982) の式と比較・検討を行った。また z_0 及び u_* と水面の波との関係を検討した。本研究の主要な結果を列挙すると次の通りである。

(1) 加藤ら (1997) の結果と同様に、摩擦速度は中立成層よりも安定成層の方では小さく、不安定成層では大きくなることを確認した。

(2) u_* と z_0 は、風波成分の $\overline{\eta^2}$ と良い相関性があり、このことは z_0 が比較的波長の短い成分波へ強く依存している事を示唆している。

(3) 成分波の時間的発達率 β は風の摩擦速度 u_* で表すと不安定・中立・安定の状態でほとんど同じに表されることが分かった。すなわち u_* を正しく求められれば、中立時の発達率を与える式が安定・不安定成層の条件に対しても適用可能ではないかと考えられる。

参 考 文 献

- 加藤 始・長山英樹・信岡尚道 (1997): 風波の発生・発達に及ぼす温度成層の効果についての研究 (2), 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 451-455.
- 加藤 始・鈴木政則・信岡尚道・村上晴通 (2000): 不安定成層時の成分波の発達率及び規則波と共存する風波に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 246-250.
- Donelan, M. (1990): Air-Sea interaction, The Sea, Vol. 9, John Wiley and Sons, pp. 239-292.
- Donelan, M., F. W. Dobson, S. D. Smith, and R. J. Anderson (1993): On the dependence of sea surface roughness on wave development, J. Phys. Oceanogr., Vol. 23, pp. 2143-2149.
- Donelan, M., F. W. Dobson, S. D. Smith, and R. J. Anderson (1995): Reply, J. Phys. Oceanogr., Vol. 25, pp. 1908-1909.
- Jones, I. S. F., and Y. Toba (1995): Comments on "The dependence of sea-surface roughness on wave development.", J. Phys. Oceanogr., Vol. 25, pp. 1905-1907.
- Francis, J. R. D. (1954): Wind stress on a water surface, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 80, pp. 438-443.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1982): The wind-induced growth of water waves, J. Fluid Mech., Vol. 123, pp. 422-425.
- Toba, Y. and N. Iida (1990): Wave dependence on sea-surface wind stress, J. Phys. Oceanogr., Vol. 20, pp. 705-721.
- Wu, J., (1980): Wind stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, J. Phys. Oceanogr., Vol. 10, pp. 727-740.