

初期風波の発達特性に関する再検討 ——温度成層の効果と摩擦速度の評価——

加藤 始*・信岡尚道**・布目彰一***

Voorrips ら (1995) が計算した温度成層が成分波の発達率 β に及ぼす影響は著者らの実験結果とは正反対である。これは風の摩擦速度 u_* が温度成層により変わる効果が入っていないためである。風速 U_{10} を与えて β を計算すると結果は一変することを抵抗係数 C_D の計算結果等から議論する。規則波の上に風を吹かせると生じる共存波では、風波成分のパワー E_w と u_* とがよい相関をもつ。本論文では風波の実験結果を追加し、 u_* と水面粗度 z_0 の関係を通して風波と共存波の共通点を探ると共に、共存波での u_* と E_w の関係を満足する風波はフェッチグラフによく合うことから、この関係が「初期風波が十分発達している」という基準を与えるものと推論する。

1. 緒 言

現在の波浪推算法においては大気が中立の場合、成分波の発達率 β を求めるため、風の摩擦速度 u_* を与えることが必要である。このため実用的には風の抵抗係数 C_D を使うことが多いが、研究的には海面粗度 z_0 と u_* の関係の解明が重要であり、 C_D や z_0 に関しては波への依存性等も含めていまだに議論が続いている。近年、温度成層時の β の計算に Janssen・Komen (1985) や Voorrips ら (1995) の理論計算結果 (Komen ら, 1994) が使われているが、観測結果との検証は必ずしも十分ではないようである。

室内実験は従来、風波の物理機構の解明に貢献しているがスケールの制約があり、 u_* や z_0 に関しても現地データとの違いが指摘されている (Donelan, 1990)。著者ら (加藤ら, 2000; 布目ら, 2001) は波浪推算への寄与を目的に風洞水槽を使った実験により、発達率 β に及ぼす温度成層の効果や共存波の特性について報告したが、最近の理論計算の結果との比較は行っていない。本論文では発達率 β および C_D に及ぼす温度成層の影響を他の研究結果と比較して議論する。

造波装置で起こした規則波の上に風を吹かせたときに生じる共存波は風洞水槽で規模の大きい波を起こすための 1 つの手法であるが、従来この共存波の特性には知られていない。本論文では風波だけのケースの測定結果を追加して、風の u_* や z_0 の特性を通して、風波と共存波との関係や初期風波の発達特性の再検討を行う。

2. 水面粗度と風の抵抗係数

一般に中立成層の下では水面上の風速分布は対数法則 $u(z) = (u_*/\kappa) \ln(z/z_0) \dots \dots \dots (1)$ を満足し、この式で z は水面上の高さ、 κ はカルマン定数 (≈ 0.40)、 z_0 は水面粗度である。波浪推算等で海面上の

風の摩擦速度 u_* を求めるときには、 $C_D = (u_*/U_{10})^2 \dots \dots \dots (2)$ で定義される風の抵抗係数 C_D がよく使われる。ここに U_{10} は海面上 10 m の風速である。海面は波の大きさによって粗度 z_0 が変化するから、海面状態と抵抗係数 C_D との関係が研究されてきた。中立成層では z_0 と C_D とが 1 対 1 に対応するから、 C_D を与える代わりに z_0 を u_* の関数として与えることが従来よく行われており、Charnock (1955) は次元解析により次式を提案した。

$$z_0 \approx g z_0 / u_*^2 = \text{定数} (= \alpha) \dots \dots \dots (3)$$

その後の研究で式 (3) は十分発達した風波の場合に当てはまる関係で、右辺は定数ではなく、主として海面状態に依存することが知られている。海面状態を代表する無次元数としては wave age の逆数の u_*/C_p がよく使われる。 C_p は波のスペクトルのピークに対応する波速である。そこで最近では式 (3) の代わりに

$$z_0 \approx g z_0 / u_*^2 = f(u_*/C_p) \dots \dots \dots (4)$$

の形の式が一般によく使われる。また海面状態を表す 1 つの指標としては従来から波高が使われてきており、 z_0 の無次元量としては波のエネルギー E による $z_0/\sqrt{E}$ の形が使われてきた。Donelan (1990) は、式 (4) の形では両辺に u_* が入るので間違った結果を導く可能性があるとして指摘している。

3. 実験方法と実験条件

風波の実験は規則波造波装置付の小型風洞水槽 (吹送距離 9.0 m) を使い、風速 4.2~8.5 m/s の 4 種類の風をかけ、吹送距離 $F=2.5, 4.0, 5.5, 7.0, 8.5$ m の点で、波は 5 本の容量式波高計を用いて同時に 3 回ずつ測定した。風はピトー管を用いて 1 地点ごとに鉛直分布を詳しく測定し、対数法則を適用して風の摩擦速度 u_* を求めた。図-1 に風波のケースでの風速分布の測定結果を示す。

波の発達に及ぼす温度成層の効果を測定する実験は表-1 に示す 5 ケースの規則波の上に、風波の実験と同じ送風機回転数の 4 ケースの風をかけて行った。温度成層は、水路にお湯、氷と温風機を用いて風温 T_a と水温

* 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
*** 学生会員 茨城大学理工学研究科博士前期課程

表-1 規則波の周期・波高

ケース名	G20	G25	G30	G35	T13
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	0.035	0.05	0.01

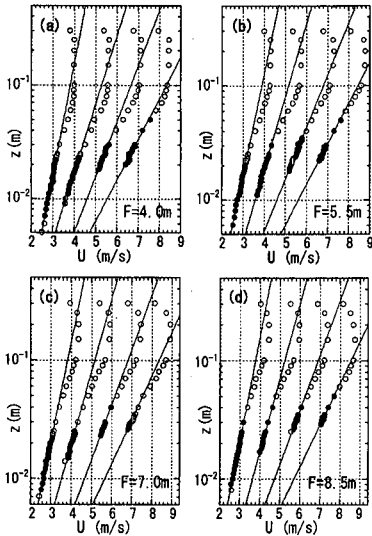


図-1 風波のケースでの水面上の風速分布

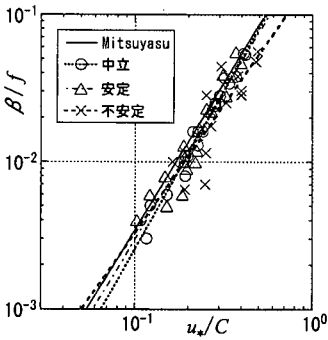


図-2 各成層状態での無次元発達率の測定結果

T_w の温度差 $\Delta T (= T_a - T_w)$ を作って発生させた。

4. 温度成層が波の発達率に及ぼす影響の再検討

加藤ら (2000) 及び布目ら (2001) は Mitsuyasu・Honda (1982) の手法を温度成層の場に応用し、風が不安定、中立、安定成層をする場合の波の発達率 β を測定して図-2 のような結果を得た。図の結果では測定点のばらつきもあり、 β/f の式は温度成層によらずあまり差がないように見える。

一方 Voorrips ら (1995) および Janssen・Komen (1985) は理論式を数値計算する方法で温度成層が発達率

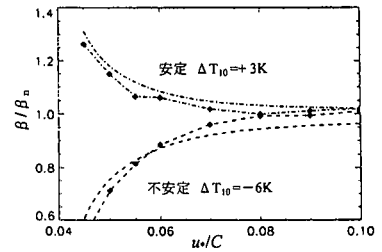
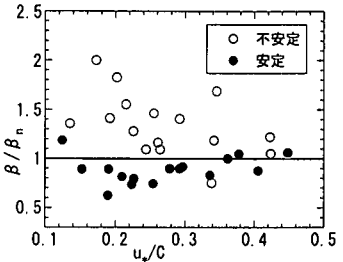
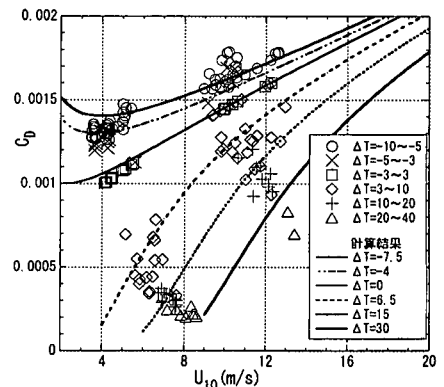


図-3 Voorrips 他 (1995) 等の理論計算結果

図-4 発達率の比 (β_n : 中立時の発達率)

β に及ぼす影響を求めた。図-3 は Voorrips らが示したものであるが、 β は安定 > 中立 > 不安定という一般常識とは逆の結果となっている。そこで本論文では図-2 の実験結果を図-3 と同じように成層時の β と中立成層での値 β_n との比で整理してみた。図-4 はその結果を示しているが、測定範囲において β は明らかに安定 < 中立 < 不安定となっており、Voorrips ら (1995) の計算結果とは正反対である。同じ基準風速に対して安定、中立、不安定成層の下で実際に発生した風波を測定した加藤ら (1997) の実験結果でも、風速が小さいほど、また吹送距離が小さいほど発生波の大きさは、不安定 > 中立 > 安定となることを見出している。図-3 の β の値が実験結果と逆になった理由は、それらが u_* を与えて計算されたことにあると考えられる。風速 U_{10} を与えて β を計算す

図-5 温度成層が C_D に及ぼす影響 (加藤ら, 1998)

ると結果は変わるはずである。図-5は成層の影響を考慮して風の抵抗係数 C_D を計算して求めた加藤ら (1998) の結果であるが、 C_D は不安定成層ほど大きくなるので、 U_{10} は同じでも u_* は不安定>中立>安定と変わることになる。

Janssen・Komen (1985) は温度差が $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ の条件で $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ に対して β を計算すると周波数が $f \cong 0.2 \text{ Hz}$ より大きい成分波に対しては、不安定成層で $\beta/\beta_n > 1$ となることを示している。図-5において $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ で海上 10 m と海面との温度差 ΔT を $\pm 7.5^\circ\text{C}$ とすると、不安定成層と安定成層での C_D の比は約 1.4 で、 u_* は 20% だけ不安定成層で大きくなることが分かる。

5. 共存波の波形とスペクトルの変化

風洞水槽で風を吹かせ定常な風波が発生したところに着造波装置で起こしたうねり性の規則波を加えると風波は減衰する。この現象は Phillips・Banner (1974) の理論で説明されており、加藤ら (2000) も実験結果がこれを支持することを示している。

規則波の上に風を吹かせたときに生じる共存波は、規則波の波形勾配、風速、吹送距離によって規則波成分と風波成分のエネルギーの大きさ及びその相対的な割合が

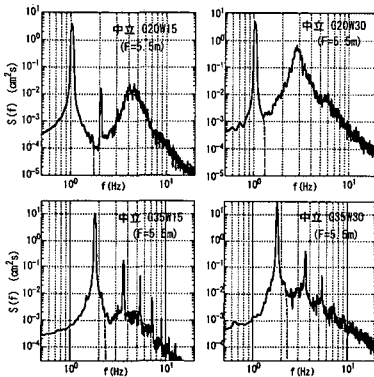


図-6 共存波のスペクトル (上段: G20, 下段: G35)

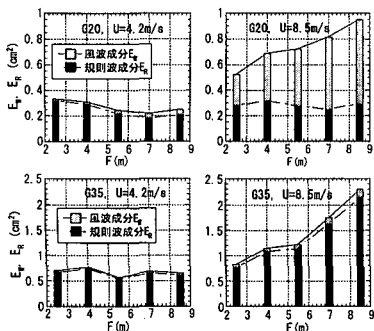


図-7 共存波の風波成分と規則波成分の変化

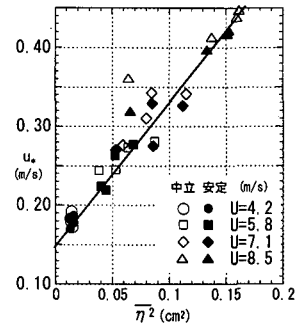


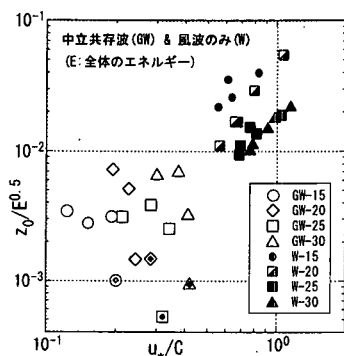
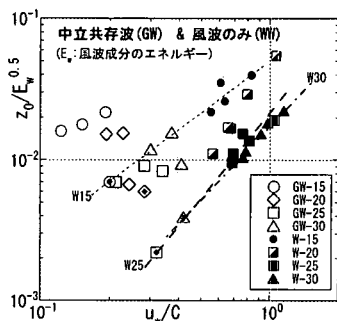
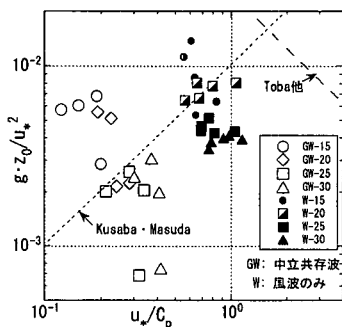
図-8 共存波の風波成分 η_w^2 と u_* の相関性

複雑に変化する。図-7は初期波形勾配 $(H/L)_0$ が最小のケース (G20) と最大のケース (G35) で、風速が最小の W-15 ($U_r = 4.2 \text{ m/s}$) と最大の W-30 (8.5 m/s) の計 4 ケースについて、風波成分と規則波成分の吹送距離に対する変化を示したものである。図-7は風速が小さいときはどちらもあまり発達しないが、風速が大きくなると波形勾配が小さいケースでは風波成分が発達し、波形勾配が大きいケースでは規則波成分が発達するという共存波の特徴をよく表している。なお規則波と風をかける順番を逆にしてもほぼ同じ共存波が生じた。

布目ら (2001) は共存波上の風の u_* (あるいは z_0) が共存波の全エネルギー η_w^2 とはよい相関を示さないが、風波成分のエネルギー η_w^2 (スペクトルの積分値) とはよい相関を示すことを見出した。図-8はこの η_w^2 と u_* の関係を示している。

6. 風波と共存波の z_0 と C_D

以下には風波と共存波のケースで測定した水面粗度 z_0 をいろいろな無次元形でプロットしたものを示す。図中の凡例で W-15~W-30 は風波のみのケースで数字が大きいほど風速は大きくなる。GW-15 等とかけた白抜き記号の点は共存波で風が W-15 のケースである。図-9は波の全エネルギー E で無次元化した z_0 と u_*/C の関係である。この図で風波のデータは風速ごとにややシフトするものの、Donelan (1990) と同じ右上がりの傾向を示すが、共存波のデータには何等まとまりがない。図-8の結果を考慮して、 E の代わりに風波成分のエネルギー E_w をとってプロットしたのが図-10である。図中の白抜き記号の中に黒い点をつけたデータは波形勾配が最大の G35 のケースである。これらの点はそれぞれ同じ風速における風波の点のほぼ延長線上にあり、G35 の共存波がその風速の風波と類似した (より発達した風波としての) 性質を持つことを示唆している。図-6の下段は G35 の共存波のスペクトルであるが、上段に示すような他のケースに比べて G35 の共存波は非線形性の強い発

図-9 全エネルギー E による z_0 の無次元表示図-10 E_w による z_0 の無次元表示図-11 g と u_* による z_0 の無次元表示

達した1成分の風波に近い性質を示すことが分かる。

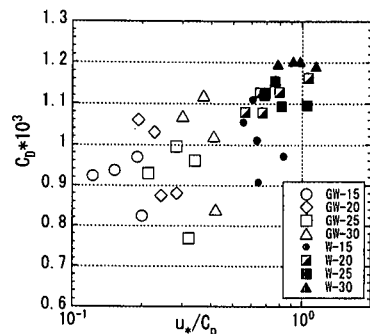
図-11は式(4)の形に z_0 を無次元化してプロットしたものである。Kusaba・Masuda (1988) は大型風洞水槽で z_0 の測定を行い、局所平衡仮説 (Toba, 1973) を満足しない低風速や小吹送距離のデータは取り除いて

$$g \cdot z_0 / u_*^2 = 1.02 \times 10^{-2} (u_* / C_p) \quad (5)$$

の関係を求めた。この関係も図-11に示してある。Maat・Oost (1991) は現地タワーで測定した無次元 z_0 の式

$$g z_0 / u_*^2 = \mu \cdot (u_* / C_p) \quad \mu \approx 0.73 \quad (6)$$

を得たが、この関係は図-11の範囲よりはるかに大きい。今回の風波のデータはKusaba・Masuda (1988) の結果よりもさらに小さいが、それ以上に風速別にシフト

図-12 抵抗係数 C_D の u_* / C_p への依存性

が生じている。また共存波のデータは式(5)のような u_* / C_p への依存性を示さない。式(4)のタイプの z_0 の無次元化には吹送距離が影響するのではないかと推測される。

図-12は風波と共存波両方の C_D の測定結果を u_* / C_p に対してプロットしたものである。全体的には u_* / C_p が小さくなるほど (wave age が大きくなるほど) C_D は小さくなるという現地データと同様の傾向を示すが、ばらつきは大きく、特に共存波は特定の傾向を示さない。

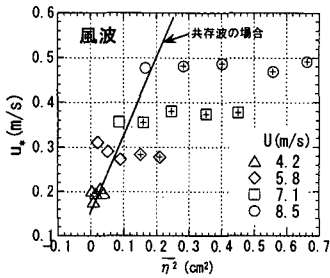
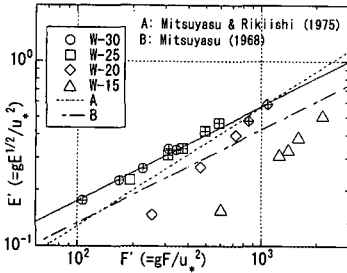
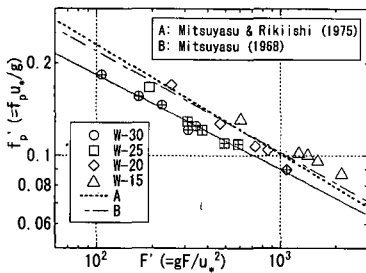
7. 共存波の風波成分についての検討

共存波は図-6と図-7で示したようにいろいろなタイプがあり、同じ風速でも u_* と風波成分のパワー $\overline{\eta_w^2}$ はいろいろ異なるにもかかわらず、図-8のようなよい相関があるということを示した。

図-13は風波の実験で得られた各吹送距離におけるエネルギー $\overline{\eta^2}$ とその地点で測定した u_* との関係をプロットしたもので、図中の直線は図-8の直線と同じである。この図は風速が大きくなり、また吹送距離が大きくなると、風波は共存波が u_* (風からの運動量輸送量) に見合った量としてもつ風波成分よりも数倍大きなエネルギーをもっていることを示している。

従来から発達初期の風波については、無次元化したエネルギー $E' (= g E^{0.5} / u_*^2)$ 、ピーク周波数 $f' (= f_p u_* / g)$ 、吹送距離 $F' (= g F / u_*^2)$ の間にあるべき乗則が成り立つことが知られている。この場合、風速や吹送距離が小さく十分に発達していない風波では測定点はずれることも分かっている (Mitsuyasu・Honda, 1975) が、どこからが十分に発達した風波かの基準は知られていない。

今回の風波データをフェッチグラフの形にプロットしたのが図-14と図-15である。+印付の点は図-13で共存波の直線よりほぼ右側に来る+付の点の実験ケースに対応している。図-14, 15で+付の点は期待されるべき乗則によく一致し、それ以外の点はこのべき乗則からはずれている。いま共存波の風波成分が飽和状態にあっ

図-13 風波の各点の η^2 と u_* の関係図-14 風波の Fetch Graph (E' vs. F')図-15 風波の Fetch Graph (f_p vs. F')

て十分発達した風波と似た性質をもっている(図-10も参照)と仮定すると、それより大きなエネルギーをもつ波は十分発達した風波と言えるのではないかと考えられる。

8. 結 論

温度成層が波の発達率に及ぼす影響、水面粗度と共存波の特性について主に議論した。主要な結果は以下の通りである。

(1) 同じ基準風速に対して温度成層を変えた実験で測定した波の発達率 β の大きさは不安定 > 中立 > 安定となる。 u_* を与えて β を求めた Voorrips ら (1995) の計算では全く逆の結果が得られているが、これは温度成層により u_* が変化する効果が考慮されてないためと考えられる。 U_{10} を与えて β を計算した Janssen・Komen (1985) の結果は実験結果と同様な温度成層の影響を示している。

(2) z_0 を g と u_* で無次元化した場合の wave age の逆数 u_*/C_p との関係では、共存波と風波とがそれぞれ別グループをなしてよい結果は得られなかった。

(3) 波形勾配が大きい共存波は、その z_0 を風波成分のエネルギー E_w で無次元化すると風波の延長線上に並び、風波と類似の性質をもつことを示す。

(4) 共存波の実験で得られた u_* と風波成分のエネルギーとの関係は、従来フェッチグラフの適用条件とされる十分発達した風波の条件にほぼ当てはまることが分かった。これは共存波の風波成分が十分発達した風波と似た性質をもつことを示唆している。

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・森 正和・信岡尚道 (1998): 水面に及ぼす風の作用への温度成層の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 431-435.
- 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.
- 布目彰一・加藤 始・信岡尚道 (2001): 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, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 201-205.
- Charnock, H. (1955): Wind stress on a water surface, Q. J. Roy. Met. Soc., Vol. 81, pp. 639-640.
- 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.
- Janssen, P. A. E. M. and G. I. Komen (1985): Effect of atmospheric stability on the growth of surface gravity waves, B-L. Met., Vol. 32, pp. 85-96.
- Kusaba, T. and A. Masuda (1988): The roughness height and drag law over the water surface based on the hypothesis of local equilibrium, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 44, pp. 200-214.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, et al. (1994): Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge Univ. Press, 532 p.
- Maat, N., C. Kraan and W. A. Oost (1991): The roughness of wind waves, Boundary-Layer Met., Vol. 54, pp. 89-103.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1975): The high frequency spectrum of wind-generated waves, Rep. R. I. A. M. Kyushu Univ., Vol. 22, No. 71, pp. 327-355.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1982): Wind-induced growth of water waves, J. Fluid Mech., Vol. 123, pp. 425-442.
- Phillips, O. M. and M. L. Banner (1974): Wave breaking in the presence of wind drift and swell, J. Fluid Mech., Vol. 66, pp. 625-640.
- Toba, Y. (1973): Local balance in the air-sea boundary processes, III. On the spectrum of wind waves. J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 29, pp. 209-220.
- Voorrips, A. C., V. K. Makin and G. J. Komen (1995): The influence of Atmospheric stratification on the growth of water waves, Boundary-Layer Met., Vol. 72, pp. 287-303.