

周期の異なる 2 成分規則波の風による発達に関する実験的研究

加藤 始*・信岡尚道**・飛田桃子***

1. 緒 言

波浪推算法においては各成分波の時間的発達率 β を与える式が必要で、これまでいろいろな方法でいくつかの式が提案されている(光易, 1995). Mitsuyasu・Honda (1982) は風波成分より波長の長い単一周周期規則波の風による発達率を測定して β の式を求めた(図-1 参照). この場合, 他の成分波は存在しないので, 非線形相互作用によるエネルギー伝達の効果は含まれない. 加藤ら(2000) は Mitsuyasu らにならった実験を行い, 不安定成層の下でも中立成層の β の式がほぼ成り立つことを導いた. しかし, 実際の風波はスペクトル構造を有しているから, 波浪推算でこれらの発達率の式が使えるためには, 各々の成分波に対してこの式が線形重ね合せ的に適用できるかどうかを確かめる必要がある. 草場・光易(1984) は, 周期の異なる 2 つの規則波が共存する 2 ケースの場合について実験を行っているが, 実験ケースが少なく, 上記の疑問点は十分に解明されていない.

本研究では, 4 種類の 2 成分規則波の上にいろいろな風速の風をかける実験を行い, 非線形相互作用の効果は無視して, 各々の成分波の発達率を求め, それらが単一周成分規則波の発達率と同じになるかどうかを明らかにすることを目的とした.

2. 実験方法と実験条件

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, 一方, 規則波成分が増大することはこれまで多くの研究で知られている. Mitsuyasu・Honda (1982) や加藤ら(2000) はその関係を利用して, 規則波の時間的発達率 β を測定している. 2 成分規則波の上に風をかけても, 単一周成分規則波と同様に各々の規則波成分が増大する(図-7 参照). ただし本研究では波形勾配が小さいためか, 風波の発達を抑制する効果はあまり強くは現れなかった.

実験は油圧制御のフラップ型造波装置がついた小型風

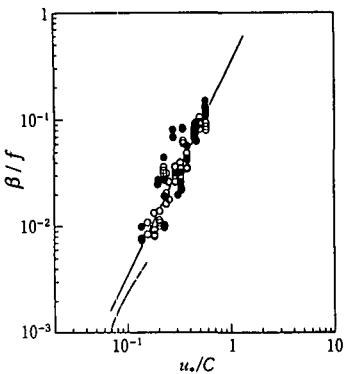


図-1 Mitsuyasu・Honda (1982) の実験結果

表-1 各ケースの波の周期と波形結果

波のケース	規則波の周期(s)	初期波形勾配
1	$T_1=0.8$	0.0075
	$T_2=1.2$	0.0075
2	$T_1=0.7$	0.0071
	$T_2=1.4$	0.0070
3	$T_1=0.7$	0.0107
	$T_2=1.4$	0.0048
4	$T_1=0.7$	0.0139
	$T_2=0.8$	0.0139

洞水槽(吹送距離 9.0 m)を使い, 表-1 に示す 4 種類の 2 成分規則波(周期 T_1, T_2 秒の 2 つの規則波を重ね合せた波)を造波装置で起こし, その上に基準風速(吹送距離 $F=5.5$ m の点の最大風速に相当)が $U_r=4.2, 5.5, 7.0, 8.5$ m/s の 4 ケースの風をかけて各々の規則波成分の発達率を測定した. 草場・光易(1984) は $T_1=0.6$ s と $T_2=0.7$ s のケース, 及び 0.7 s と 1.4 s のケースについて実験を行っているので, 表-1 の実験ケースはそれを参考にして決めている. 使用した油圧式造波装置は, 制御部に時系列数値データを加えて造波板を駆動するものである. 予備実験では周期 T_1 または T_2 秒の 1 成分波を起こしてその波形勾配を調整し, 本実験ではその電圧の和を数値データで与え, 目的とする合成波を起こした. 波の測定は各ケースとも吹送距離 $F=2.5\sim 8.5$ m の間で同時に 5 本の容量式波高計を 30 cm 間隔で移動させて, 合計 21 点で $\Delta t=1/50$ 秒, $N=8200$ で水面変化を測

* 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
*** (株)ユードム

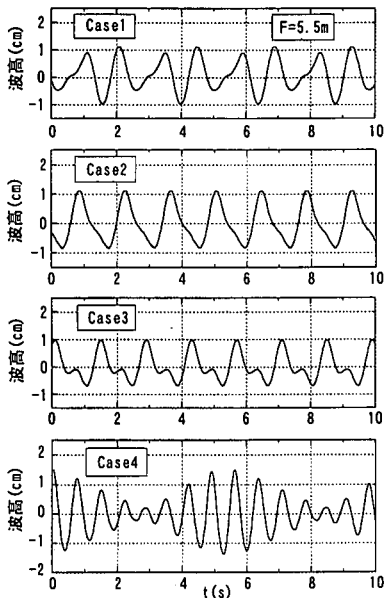


図-2 各ケースの無風時の波形 ($F=5.5\text{m}$)

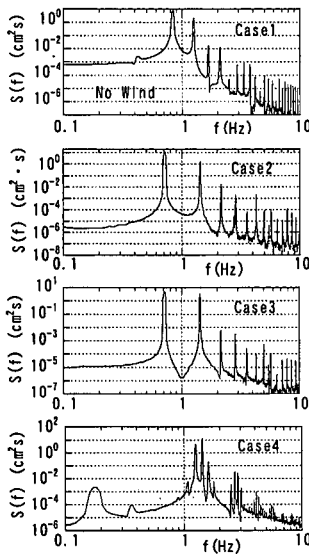


図-3 各ケースの無風時の形のスペクトル ($F=5.5\text{m}$)

定した。

無風時の各ケースの波の波形を図-2に、波のスペクトルを図-3に示している。2成分波の位相速度が異なるので場所ごとに波形は変化し、周期が $T_1=0.7\text{s}$ 、 $T_2=0.8\text{s}$ と接近しているCase 4においては水面変動にビートが生じている。また第2の波の周期 T_2 を第1の波の周期 T_1 の丁度2倍に設定したケース2の波形は強い非線形性をもつ波のような波形になっている。図-3のスペクトルから、高調波成分はあるものの、基本周波数成分が2つある規則波が生じていることが分かる。

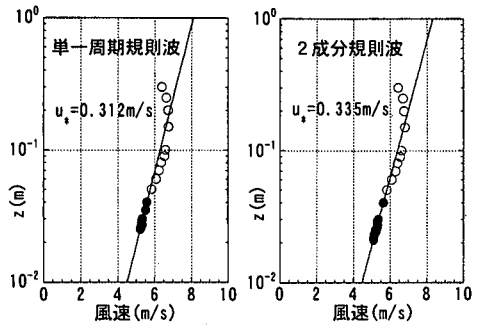


図-4 単一周期規則波と2成分規則波上の風速分布の比較

風の摩擦速度 u_* に関しては、同じ風速の下で波形勾配があまり変わらない1成分規則波の場合と、2成分規則波の場合との風速分布をピトー管を使って測定し、対数法則を適用して u_* の違いを調べてみた。図-4はその1例を示したものであるが、両者の間にほとんど差はないことが分かった。そこで本実験の大部分のケースでは、平行して行っていた1成分規則波の上に風をかけた場合の u_* を用いて解析を行った。この点については後で少し検討する。

3. 解析方法

3.1 共存波の波形とスペクトルの変化

これらの波の上に風を吹かせるとさらに風波成分が生じて、共存波のスペクトルは複雑な形をしてくる。図-5は測定した共存波の波形、および逆FFTを使ってそれから分離した(図-8参照)規則波成分と風波成分の波形

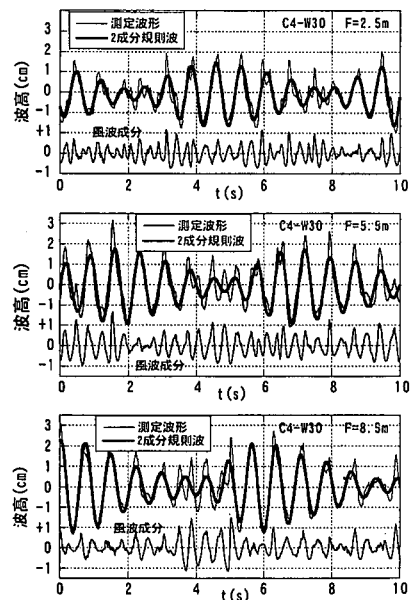


図-5 規則波と風波成分の分離 (Case 4, $U=8.5\text{m/s}$)

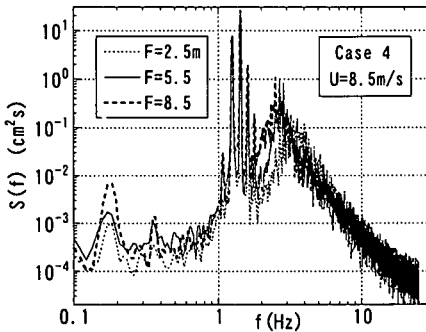


図-6 共存波のスペクトルの吹送距離による変化 (Case 4, $U=8.5$ m/s)

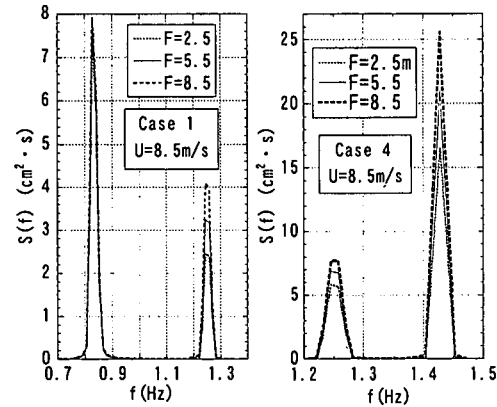


図-7 2成分規則波のスペクトルピークの発達 (左: Case 1, 右: Case 4)

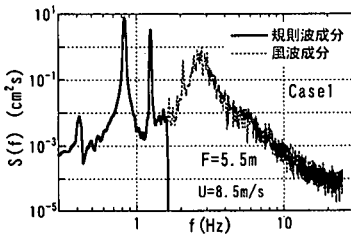


図-8 Case 1 の波のスペクトル (逆 FFT の風速成分の除去範囲を示す)

を示している。この風波成分については後で検討する。

図-6 と図-7 は Case 4 における共存波のスペクトルの吹送距離による変化を示している。図-5 で示した逆 FFT の計算は図-8 に示すような風波成分のスペクトルを差し引いて行っている。高周波側の規則波 f_1 の 2 倍以上の高調波成分のエネルギーが風波成分に入る場合もあるが、その影響は小さいので無視した。

3.2 2成分規則波のエネルギーの抽出方法

周波数 $f_1 (=1/T_1)$, $f_2 (=1/T_2)$ の規則波成分のエネルギー E_1 , E_2 は、共存波のスペクトルを図-9 のように f_2

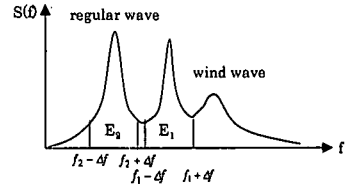


図-9 規則波成分と風波成分の分離

波の高調波成分のパワーは無視して $(f_1 + \Delta f)$, $(f_2 \pm \Delta f)$ の間で積分して求めた。 E_1 を求める積分範囲の上限は、図-8 に示した風波成分の除去範囲の下限と同じである。

3.3 正味の発達率の求め方

風をかけると、吹送距離が大きくなるに伴って図-7 から分かるように、各々の規則波成分は発達しスペクトルのピークも大きくなる。正味の発達率は、風的作用を受けている時のエネルギー E_1 (周期 T_1), E_2 (周期 T_2) を、無風時の規則波の各エネルギー $(E_0)_1$, $(E_0)_2$ で割った値の吹送距離に対する増加率により求められる (草場・光易, 1984)。図-10 は無風時の波の測定結果から、 T_1 , T_2 ごとに各点 (21 点) でのエネルギーをプロットしたものの、図-11 は規則波の上に風をかけた時の、 T_1 , T_2 ごとに各点でのエネルギーをプロットしたものである。図-12 は各点での E/E_0 の値を示しており、実線は式 (1) の関係を表している。

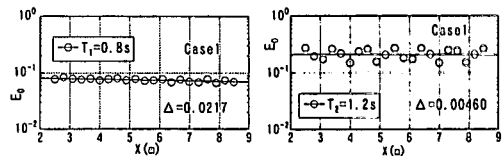


図-10 無風時のエネルギー E_0 (Case 1)

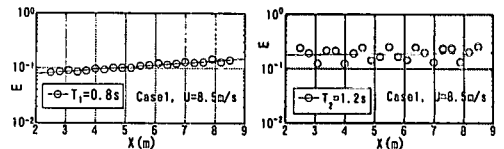


図-11 風をかけた時のエネルギー E (Case 1)

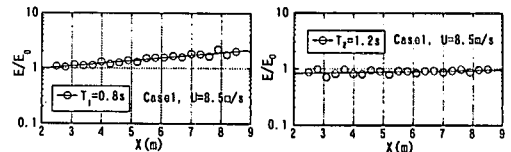


図-12 正味の発達率 α を求める関係 (Case 1)

$$(E/E_0)_i = (E/E_0)_{i0} \exp(\alpha_i x) \quad (i=1, 2) \dots\dots (1)$$

ここで、 E は風的作用を受けている時のエネルギー(図-9参照)、 E_{0i} は無風時のエネルギー、 x は吹送距離 $F(m)$ である。

α の求め方としては加藤ら(2000)やMitsuyasu・Honda(1982)が行っているように別のやり方がある。すなわち、図-10のような無風時のエネルギー E_0 の変化から式(2)で減衰係数 Δ を求め、図-11の E のプロットから見かけの発達率 α' を求め、最後に正味の発達率 α を式(4)で計算する方法である。

$$E = E_0 \exp(-\Delta x) \dots\dots\dots (2)$$

$$E = E_0 \exp \alpha' x \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha = \alpha' + \Delta \dots\dots\dots (4)$$

この場合の利点は Δ が理論式でも与えられることである。加藤ら(2000)は式(2)で求めた Δ とその理論値とがよく一致することを報告している。今回も2つの方法による Δ の値をいくつかのケースで比較してみたが、両者の結果は大部分の場合よく一致していた。

4. 実験結果とその考察

4.1 2成分規則波の発達率

成分波の時間的発達率 β は α から次式で計算される。

$$\beta = C_\theta \alpha \dots\dots\dots (5)$$

ここに C_θ は線形理論から求めた規則波の群速度である。

加藤ら(2000)は水面上の風が中立と不安定のケースで、布目ら(2001)は中立と安定のケースでMitsuyasu・Honda(1982)の無次元発達率の式に実験結果がよく合うことを示しており、それらは以下の各式で表される。

$$\text{Mitsuyasu 等 (1982): } \frac{\beta}{f} = 0.34 \left(\frac{u_*}{C} \right)^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{加藤ら (2000): } \frac{\beta}{f} = 0.277 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{1.94} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{布目ら (2001): } \frac{\beta}{f} = 0.330 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{2.08} \dots\dots\dots (8)$$

これらの単一成分規則波との比較のために、今回の2成分規則波の実験で得られた無次元発達率 β/f と無次元摩擦速度 u_*/C の関係をプロットしたのが図-13である。ここに f はそれぞれの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り、図中の3つの直線は式(6)、(7)、(8)を表している。またケース3で周期の長い $T_2=1.4s$ の場合の風速が小さい2つのケースでは β がマイナスの値をとるため、図-13には含まれていない。図-13の結果を見ると、左下方にある3点を除いて今回の無次元発達率 β/f の値は、単一成分規則波の関係を近似的に満足しているが、やや大きめであることが分

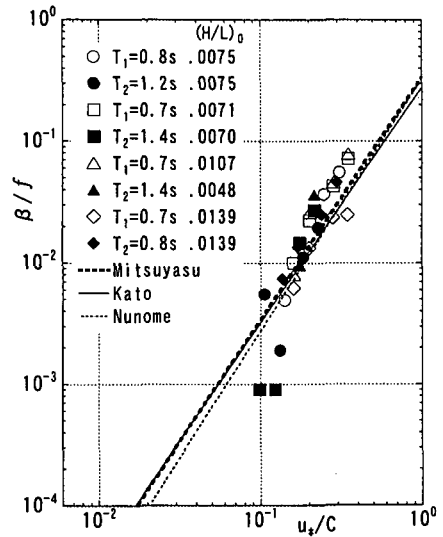


図-13 無次元発達率 β/f と無次元摩擦速度の関係

かる。左下方でずれる点は、ケース2で周期が大きい $T_2=1.4s$ の場合と、ケース1で周期が大きい $T_2=1.2s$ の場合である。すなわち T_1, T_2 のペアのうち周期が長い方の成分波で風速が小さい場合に発達率が小さく出る傾向が見られる。

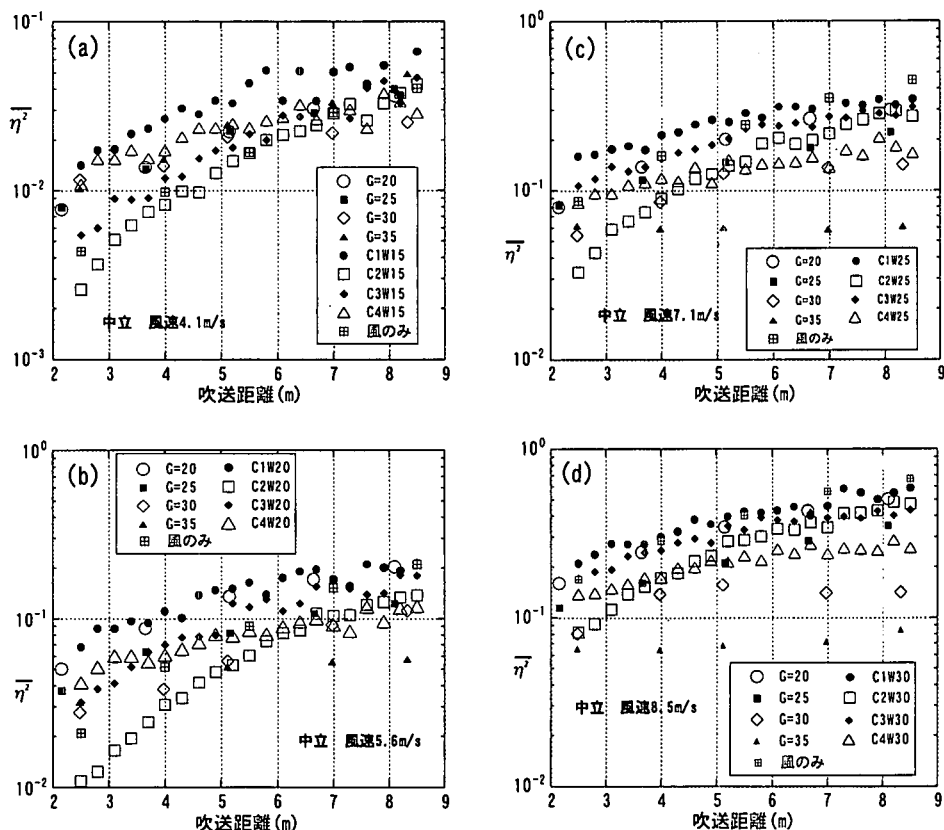
草場・光易(1984)は周期0.6sと0.7sと接近した周期を持つ2成分規則波の場合、周期が短い0.6sの成分波は発達せず β がマイナスになったと報告しているが、われわれの実験結果ではそのような傾向はなく、今述べたようにむしろ逆のような結果となっている。

いずれにせよ、今回は空間的な発達率をスペクトルの変化から直接求めた訳であるが、厳密には接近したもう1つの成分波との間の非線形エネルギー伝達の影響を考慮する必要があるかも知れない。

4.2 規則波と共存する風波成分の大きさの比較

布目ら(2001)は1成分規則波と共存する風波成分の大きさが、 u_* や水面粗度と強い相関をもつことを示している。そこで、今回の2成分規則波の場合も風波成分を逆FFT法で求め(図-5参照)、1成分規則波の場合、及び風波だけの場合との比較を、吹送距離に対するプロットの形で図-14(a)~(d)に示す。図中の凡例にある $G=20\sim35$ は布目ら(2001)の単一成分波の実験で、初期波形勾配が0.01~0.05のケースを表しており、C1W25等の表記のC1~C4は本研究のケース1~ケース4を、W25は風速のケース別を表している。

これらの結果では、2成分波のケース2(□の点)を除いて、2成分波の場合の方が1成分波の場合より風波成分の $\overline{\eta^2}$ は大きい傾向がある。またケース2を除く2成分波のケースと、1成分波の波形勾配が小さいケースで



図—14 単一成分規則波及び2成分規則波と共存する風波成分の比較 (布目ら, 2001 のデータも使用)

吹送距離と風速が小さいときは、規則波と共存するケースの風波成分の方が、風波だけの場合よりも $\overline{\eta^2}$ が大きいという、やや意外な結果が見られる。しかし吹送距離が大きくなると、風波だけのときの方が $\overline{\eta^2}$ は大きくなっている。また1成分波で波形勾配が大きいケース ($G=30$, $G=35$) で吹送距離が大きくなっても $\overline{\eta^2}$ が変わらないのは、長周期の規則波による風波抑制効果(加藤ら, 2000)のためである。

風波成分の $\overline{\eta^2}$ がどのような挙動をするかという問題は風の抵抗係数と水面状態の関係とも関連があると考えられ、今後さらに調べる必要がある。

5. 結 論

本研究で得られた主要な結果は以下の通りである。

(1) 2成分規則波の各々の発達率は、風速の小さい場合の一部を除いて単一成分規則波の結果とほぼ一致するが、やや大きめの値が得られた。

(2) 草場・光易 (1984) では、周期 T_1 , T_2 が近い2成分波では、周期の短い方の波は発達せず、減衰するという結果が得られているが、本研究では、そのようなことは見られなかった。一方、周期 T_1 , T_2 が離れたケースに

おいて、風速が小さいときには周期の長い T_2 の波の発達率が小さくなり、マイナスになる場合も出現した。

(3) 共存波の風波成分の大きさは2成分規則波の方が多少の例外はあるが、一般に単一成分規則波のケースより大きい傾向が見られた。

(4) 吹送距離が小さい所で風速が小さいときには、共存波の風波成分の方が風波だけの場合より大きいという、やや意外な傾向が見出された。

謝辞：最後に、本研究に協力して頂いた当時4年生の布目彰一君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 加藤 始・鈴木政則ら (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.
- 草場忠夫・光易 恒 (1984): 二成分規則波の風による発達 (序報), 九州大学応用力学研究所所報, 第60号, pp. 455-465.
- 布目章一・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.
- 光易 恒 (1995): 海洋波の物理, 岩波書店, 210 p.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1982): Wind-induced growth of water waves, J. Fluid Mech., Vol. 123, pp. 425-442.