

流れのある風波に関する実験的研究

砂 田 憲 吾*・水 谷 俊 孝**

1. ま え が き

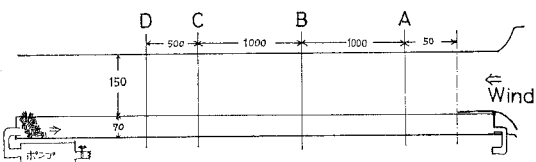
流れに逆らって風が吹く場合には海が荒れることが知られており、特に海峡など比較的短い fetch で大きな潮流がある場所では、波浪の推算に無視できない問題となる。この点に関して、流れのあるときの風波の研究はあまり多くなく、風波の発生発達理論には水中の流れの効果が考慮されていない。

流れのある風波の研究のうち Francis & Dudgeon¹⁾ は水循環式風洞水路で、写真を用い波長、波高等を測定し、波長、周期および波高の流れによる変化を調べている。加藤らは^{2)~5)} 大型の水循環式風洞水路を使って固定した波高計による記録から波のパワースペクトルを求め、水の流れを考慮に入れて変換されたスペクトル、波高を中心にこの問題を実験的に検討している。

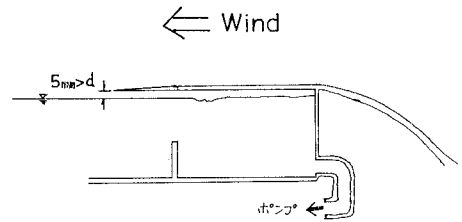
本研究では、まず、トレーサーによる表面流速の測定および水素気泡法による流速分布の測定を行い、風速が小さく波の起きていない状態と、風速をあげ波の起きている状態との比較、検討を行った。つづいて、加藤らの実験範囲外である fetch の短い領域で、逆流の存在する場合の風波の特性について調べた。

2. 実験概要

実験はエッフェル型低乱風洞水路を用いて行った。測定部は図—1 に示すように、幅 25 cm、水深 7 cm、風洞部の高さ 15 cm で長さは 4 m ある。風下端にはビニールくず、テトラポッドによる消波製置を設置し、その下に水循環用のパイプが設置されている。風上端では水の吹き込みが測定部に影響しないようにもぐりぜきを設置



図—1 測定部断面図



図—2 空気と水との接触部

し、アクリル板を水面に接しない範囲で水面に近づけてある(図—2 参照)。

水の流れの条件は、ポンプの流量により、流れのあるケースと流れなしの計 3 ケースとし、風速は、送風機の回転数により設定した(表—1 参照)。

表—1 実験ケース

a. 風速の設定

	送風機回転数	U_e 代表風速
RUN 1	710 rpm	3.3 m/sec
RUN 2	1000 rpm	6.4 m/sec
RUN 3	1300 rpm	10.3 m/sec

b. 水流の設定

	ポンプ流量	断面平均流速
流れなし	0 l/sec	0 cm/sec
Case I	1.3 l/sec	9.9 cm/sec
Case II	2.3 l/sec	15.4 cm/sec

本実験での測定点は図—1 に示した A, B, C, D の 4 点で fetch はそれぞれ 50, 150, 250, 300 cm である。

水の流れの測定は、表面流については流動パラフィンをしみ込ませた直径 2 mm の薄い円板状紙片をトレーサーとして 50 cm 間を通過する時間をストップウォッチにより測定した。水中流については、水素気泡法により定性的な観察を行った。

波の測定は、メニスカスの影響の小さい抵抗線式波高計を使った。波のデータは、AD変換を行い紙テープに記録したあと、東工大情報処理センター設置の電子計算機(M-180)を用い処理を行った。

* 正会員 東京工業大学土木工学科

** 学生会員 東京工業大学大学院土木工学科

3. 実験結果および考察

(1) 表面流速

風波の発生以前の風速における水面および水中の状態を発生以降の状態と比較した。表面流速については、(図-3) Plate⁶⁾ が風を乱流、水を層流として式(1)を導いている。

$$u_s = U_e \sqrt{\frac{\lambda \rho_a}{32 \rho_w}} \left(\frac{u_s h}{\nu_w} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

u_s ; 水の表面流速

U_e ; 空気代表速度

h ; 水深

λ ; Darcy Weissbach friction factor.

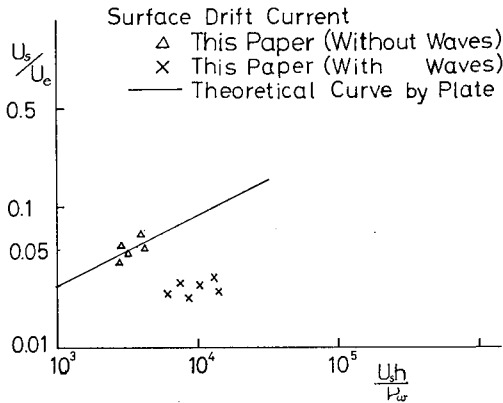


図-3 表面流速

この式は風速が 710 rpm の場合 (△印) には、実験値とよく一致している。しかし 1000 rpm および 1300 rpm の場合 (×印) には、この理論値は実験値よりも大きめの値を示す。Plate が仮定しているように水の流れが層流となっているかを調べるため水素気泡により水の流速分布の様子を観察した。波の起きていない 710 rpm では、水面付近の水粒子のみが風にひきずられているのに対し、波の起きている 1000 rpm, 1300 rpm では水中にまで乱れが及んでいる。そこで (1) 式で動粘性係数 ν_w を用いるかわりに渦動粘性係数 ϵ_w としたほうが、現象により近い表現が得られると推察される。

(2) 波の統計的性質

波高計から得られたデータをゼロアップクロス法により波高および周期を求めたり、流れなしの場合について統計的性質を調べた。

エネルギースペクトル $E(f)$ が与えられた時の全パワーは次式で与えられる。

$$E = \int_0^\infty E(f) df = \bar{\eta}^2 \dots\dots\dots (2)$$

このパワーと有義波高 $H_{1/3}$ との関係を図-4 に示す。

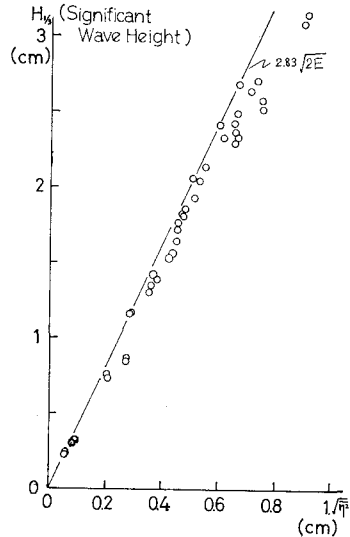


図-4 水位変動の R.M.S. $\bar{\eta}^2$ と有義波高

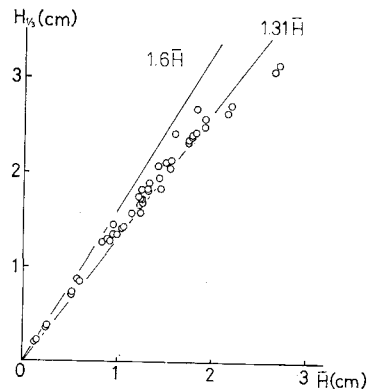


図-5 平均波高と有義波高

これは従来の $H_{1/3} = 2.83 \sqrt{2E}$ と比較的良好一致している。

波高の分布について整理すると、平均波高 $\bar{H}$ と有義波高 $H_{1/3}$ との関係は図-5 に示すように $H_{1/3}/\bar{H} = 1.31$ となる。これは Longuet-Higgins⁷⁾ の理論値 1.60 よりやや小さくなっている。これより従来行われた風洞実験による報告⁸⁾ と同様に実験風波が Rayleigh 分布よりも、正規分布に近い分布形をもつものと考えられる。

(3) 逆流の場合の Fetch Graph

波高に関するデータを整理すると 図-6(a), 図-6(b) のようになる。これは、一般にいわれていると同様に、逆流の存在する場合のほうが波高が大きくなることを示している。また、その傾向は fetch の短い部分において特に顕著である。また 図-6(a) で示されるように流れの大きい Case II の場合には、Fetch の短い部分で波高が高くなり、その後一時的に減衰して再び成長していく、これは部分碎波が起こり、波高が一時的に減衰したもの

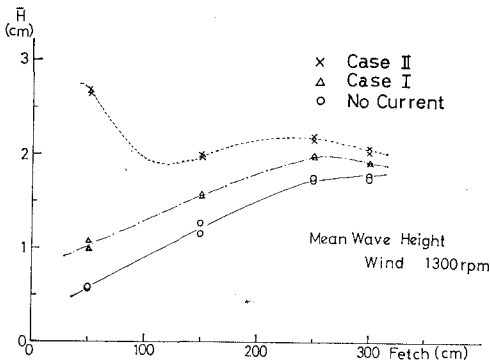


図-6(a) 平均波高 1300 rpm

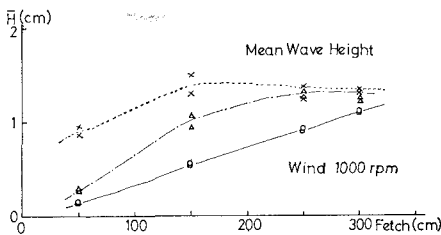


図-6(b) 平均波高 1000 rpm

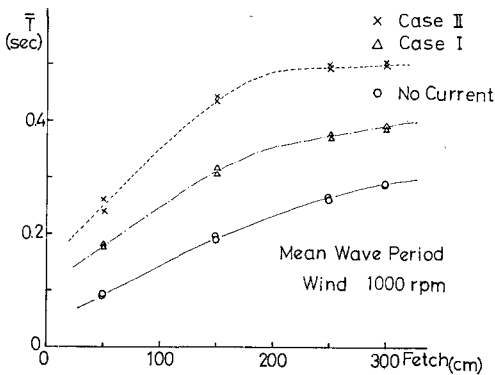


図-7 平均周期 1000 rpm

と考えられる。

波の周期に関するデータを整理すると図-7 のようになり、逆流のある場合のほうが周期が長くなり、また、fetch の短い部分では、その増加傾向は顕著である。

(4) パワースペクトル

スペクトルは、A-D変換によって得られたデータを用い Cooley-Tukey 法 (FFT) により計算を行った。

まず流れなしでの結果を図-8 に示す。fetch の増加につれて、スペクトルのピークが、低周波側に寄りながら増大する。また、高周波側でのスペクトルは、同じ傾きを持っている。本研究は fetch の短いケースについて調べたが、この結果は従来の研究での風波のスペクトル

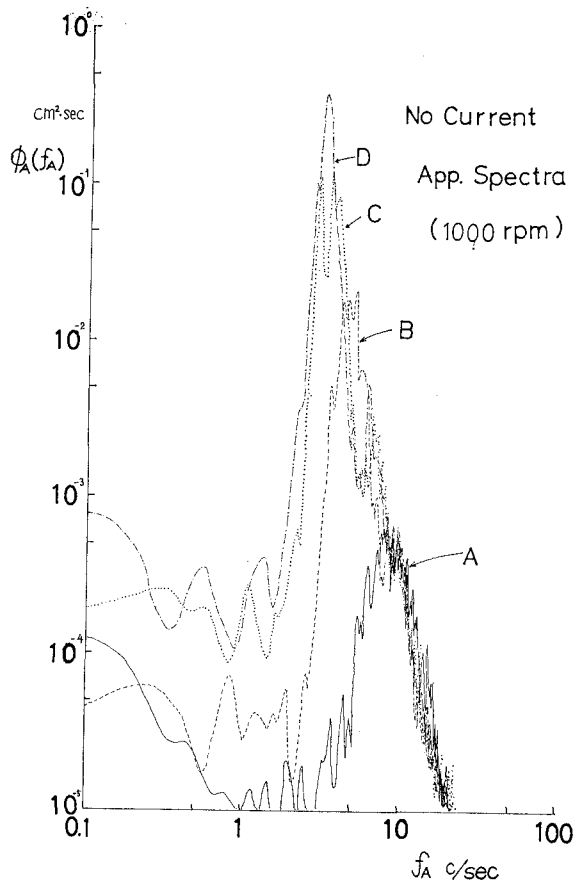


図-8 流れなしでのスペクトル 1000 rpm

と同様である。

次に流れのある Case II, 風速 1000 rpm での、スペクトルを図-9 に示す。A点でのスペクトルは、他の点と大きく異なり、高周波側に寄っていて、ピークがいくつかの周波数に対して存在している。また B, C, D 点でのスペクトル曲線はほとんど同じ形と大きさを示している。これは前項でも記したと同様に、逆流のある場合には fetch の短い部分で発達 が著しいことを示している。

観察によると流れのない場合には波の背に波長のごく短い波が存在するのに対し逆流のある場合には波形がなめらかになっているがこの点は 図-8, 図-9 から逆流のある場合には高周波成分が低くなることから示される。

図-8, 図-9 は、吹送流および逆流による効果が異なるので、直接比較を行うには、静水時におけるスペクトル (真のスペクトル) に変換する必要がある。このため、加藤らの行った方法²⁾⁻⁵⁾ のうち、単純な方法を用いて真のスペクトルへの変換を行った。その一例を図-10 に示す。fetch 150 cm での流れの効果をみると、ピー

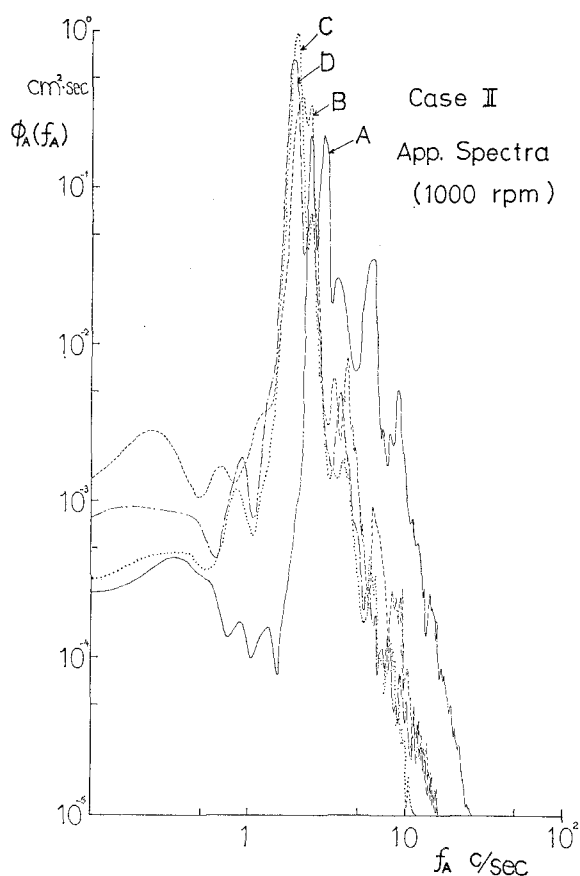


図-9 Case II でのスペクトル 1000 rpm

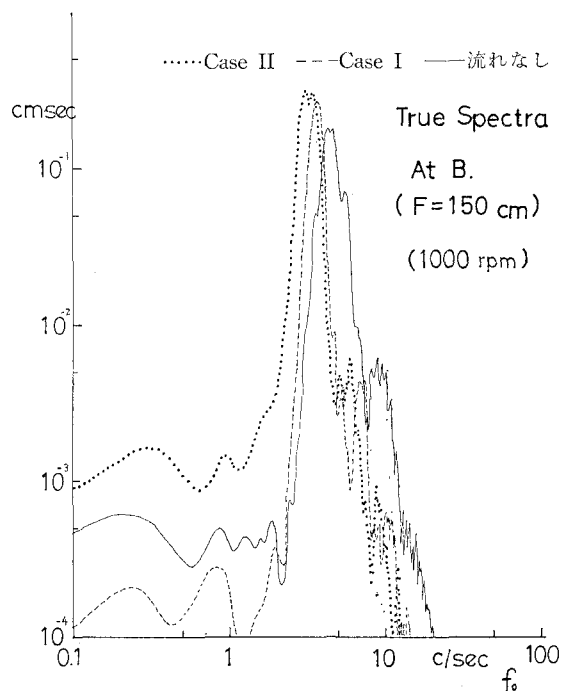


図-10 静水中に変換した真のスペクトル

クでの frequency は、逆流により低周波数側へ移っていき、そのピークは増大していく。これは、順流の場合の報告⁵⁾ から予想される傾向と一致する。

4. あとがき

これまで他の研究者により報ぜられた結果^{1),2),5)} と同様に、fetch の短い本実験においても波高および卓越波の周期が、逆流とともに大きくなり、特に周期にこの傾向が著しいことがわかった。

また発達過程は、逆流の場合初期において著しく、徐々にゆるやかとなる。すなわち風上端での波の発生は逆流の存在と密接な関係があるように思われる。

実験条件によっては、fetch が長くなるのに対し波高が減少する場合もあった。これは波形勾配に限界があり部分砕波を起こしている可能性があるため、今後波形勾配と発達率との関係を調べてみる必要がある。

参考文献

- 1) Francis, J. R. D. & C. R. Dugeon.: An experimental study of wind-generated waves on water current, Q. J. Roy. Met. Soc., Vol. 93, 247 ~ 253, 1967.
- 2) 加藤 始・佐野喜久雄: 流れの中の風波についての研究 (1), 第17回海岸工学講演会論文集, 19~24, 1970.
- 3) 加藤 始・佐野喜久雄: 流れの中の風波についての実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第9巻3号, 1970.
- 4) 加藤 始: 対数分布の吹送流に対する波速の計算, 土木学会論文報告集, 第239号, 37~46, 1975.
- 5) 加藤 始・鶴谷広一: 流れの中の風波の研究(2), 第23回海岸工学講演会論文集 (1976).
- 6) Erich, J. Plate: Water Surface velocity induced by wind shear, EM3, 295~312, 1970.
- 7) Longuet-Higgins, M. S.: On the statistical distribution of the heights of sea waves, J. Mar. Res., Vol. 11, 245~266, 1952.
- 8) 湯 麟 武・郭 金 棟: 浅海風波の発達に関する実験的研究, 第16回海岸工学講演会論文集, 59~63, 1969.
- 9) Kinsman: Wind Waves, Prentice Hall.
- 10) 堀川清司: 海岸工学, 東京大学出版会.
- 11) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.