

逆流中の風波の発達特性について

鶴谷 広一*・中野 晋**・柳嶋 慎一***

1. まえがき

海洋において発生する風波の推算と予報は、工学的見地から、また船舶の航行の安全の確保のためにもきわめて重要である。しかし、時には予測されるよりもかなり大きな波が外洋で起こることがあり、昭和 44 年の「ぼりばあ丸」、55 年の「尾道丸」等の多数の大型船が本州東方海上のいわゆる野島崎沖で海難に遭遇している。このように大きな波がなぜ起こるのかについてはいくつかの可能性が考えられる。まず、進行方向の違う波と波との非線形相互作用によるもの、次に流れのある場に流れのないところから波が進入してきて流れと波の相互干渉（いわゆる radiation stress）の結果により生じたもの、最後に流れ（逆流）のある場に強い風が吹いたために生じた等の原因が考えられる。特に、強い逆流のあるところでは、短いフェッチでもかなり大きな波が生ずる可能性が十分ある。また、河口部や海峡などの大きな流れのあるところでは、短いフェッチでも波浪の推算に流れを無視することはできない。その中でも、流れの方向が風の方向と対向する逆流の場合には、生ずる波の波長も波高も大きくなるために、順流よりも工学的には重要と考えられる。

流れの中での風波の発達に関する研究で、代表的なものは加藤他^{1),2),3)}によるものである。彼等は詳細な実験結果をもとにして、流れの効果を含んだ等価吹送距離の概念を提案し、これを用いれば流れの中での風波の発達が流れのない場合と同様の形式で表されて流れの中での

波の推算が可能となることを示した。この方法では、流れがあっても波は常に単調に増加し続けることになる。しかし、実験によれば流れが波の発達に与える影響は劇的とも言えるほど大きいので、逆流の流速が大きくなってゆくと波が急速に発達し、碎波等により波の発達が抑制されることも考えられる。本研究ではこのような考えのもとに、これまで十分解明されていなかった逆流の流速が大きくなって波の発達がかなり顕著になるような条件のもとでの波の発達あるいは減衰と伝達特性について実験により検討したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した風洞水路の平面図を図-1に示す。流れを起こすための回流装置は昭和 60 年 1 月に改造され、最大流量はこれ迄の 250 l/s から 580 l/s に増強された。この結果、水深 50 cm、幅 150 cm の断面における最大流速は 33 cm/s から 77 cm/s となり、より広範囲な流速条件のもとでの実験が可能となった。

流速の条件は流れなしと断面平均流速 ($\bar{U}_w$) が 14.5、20.3 および 26.3 cm/s の 3 ケースで、それぞれの流速に対して風速を断面平均 ($\bar{U}_a$) で 8.3 と 11.0 m/s の 2 種類とした。以上の実験は回流装置が改造される前の昭和 58 年度に行った。回流装置の改造後は断面平均流速が 47.4 cm/s と 67.2 cm/s の流れに対して中央断面の平均風速が 5.7、7.2、8.6、10.0 および 11.3 m/s の 5 ケースとした。流速は DISA 社製レーザー・ドップラー流速計（出力 25 mW）を用いて測定した。波高は抵抗線

式波高計を図-1に示す A-2 から D 点までの 7 測点に設置し、同時に計測した。波長の測定には波高計を 44.5 cm の間に 4 本設置し、各ケース・各測点に応じた波長の波が検出できるようにした。風速分布はピトー管と MKS 社の高精度差圧計で測定し、その勾配から風の摩擦速度 u_{*0} を求めた。

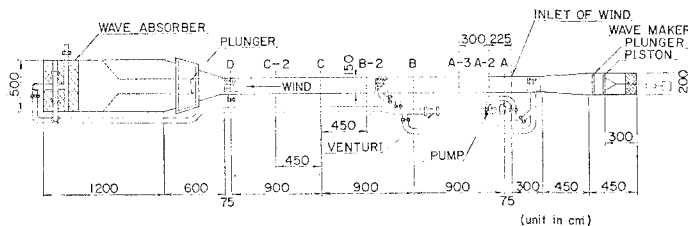


図-1 実験水路平面図

3. 等価吹送距離を用いた波の発達の表示

流れを考慮した等価吹送距離を F' とすると、流れの

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長
 ** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室
 *** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

中での波の波高 $H_{1/3}(4\sqrt{\gamma^2})$ と波長 L_m (周波数 f_{0m}) の発達は次式で表される³⁾.

$$\frac{gH_{1/3}}{u_{*a}} = 0.0222 \left(\frac{gF'}{u_{*a}^2} \right)^{0.669} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{u_{*a}f_{0m}}{g} = 0.939 \left(\frac{gF'}{u_{*a}^2} \right)^{-0.854} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 u_{*a} は風の摩擦速度、 f_{0m} はスペクトルのピーク周波数に対応する真の周波数である。真の周波数とは、波長 L_m の波の静水中での周波数で、次式で表される。

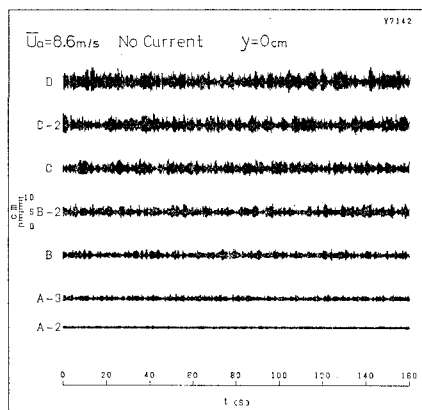
$$f_{0m} = \frac{1}{L_m} \left\{ \left(\frac{gL_m}{2\pi} + \frac{2\pi T_1}{\rho L_m} \right) \tanh \frac{2\pi h}{L_m} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 g は重力の加速度、 T_1 は水の表面張力、 ρ は水の密度、 h は水深である。

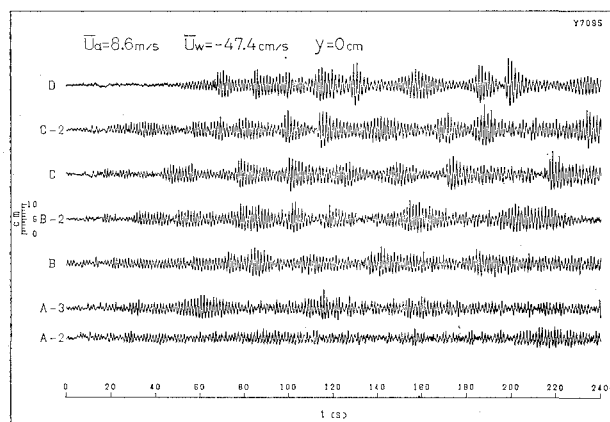
4. 実験結果とその検討

(1) 流れのある場合とない場合の発生波の比較

図—2 は流れのない場合の水路中央における各測点での水位変化を示したもので、フェッチが大きくなると波高も大きくなるのがわかる。図—3 は逆流中での波の発



図—2 風波の波形 (流れなし, $\bar{U}_a=8.6$ m/s)



図—3 風波の波形 (逆流中, $\bar{U}_w=-47.4$ cm, $\bar{U}_a=8.6$ m/s)

達をフェッチごとに示した一例であるが、図—2 と同じ風速であるにもかかわらず、波形がかなり違うことが特徴的である。まず気付くことは、フェッチの短いところでの波高の増大が大きいこと、波の周期が全体に長くなっていること、波が波群を形成しながら伝達していること等である。実験においては、逆流の流速が 30 cm/s を越えるとフェッチの短いところで風の方向と直角に振動するいわゆる横波が時間と共に発達してくるので、図—3 では風のかけ始めから 240 秒間のみのデータを示してある。このケースでは 240 秒後でもそれほどはっきりとした横波の形成はまだ見られない。

(2) ゼロアップクロス法による発生波の解析

複数の波高計群からゼロアップクロス法による波の解析を以下に行った。まず両チャンネル (1 チャンネルを風上側、2 チャンネルを風下側とする) の波高計の出力信号からそれぞれゼロアップクロス法により個々の波を分離する。 $H_i(n_i)$, $T_i(n_i)$ ($i=1, 2$) を i チャンネルの n_i 番目の波の波高及び周期とし、この波が時刻 $t_i(n_i)$ から始まるものとする。ここに、 $t_i(n_i)$ は水位がゼロを下から上へ通過するときの時刻で、デジタルデータより線形補間して求められる。これらの個々の波について次の 4 つの条件を満たす波について波長と波高を求めた。

- [条件 1] $t_1(n_1)$ が $t_2(n_2)$ より小さいこと。つまり波が風下側の波高計よりも風上側の波高計に先に到達すること。
- [条件 2] $t_1(n_1+1)$ が $t_2(n_2+1)$ より小さいこと。つまり 1 つの波が風下側の波高計を通過し終る前に風上側の波高計を通過すること。
- [条件 3] $t_1(n_1+1)$ が $t_2(n_2)$ より大きいこと。つまり波長が 2 つの波高計間の距離よりも大きいこと。
- [条件 4] 2 点間で波高及び周期が 2 割以上変化しないこと。

この 4 条件を満たすものだけを波として取り出した。さらに、こうして得られた波長の分布を調べると、平均波長 $\bar{L}$ の 2.5 倍以上の波が検出されていたが、これらの波は現実的でなく、解析上生じたものであると考えて棄却し、平均波高、平均波長を求め直した。

図—4 は波高と波長の確率密度関数 $P(\bar{H}/H, L/\bar{L})$ が流れとともにどのように変わるかを調べたものである。図の上から順に結合確率密度が 0.25 以上、0.5 以上、1.0 以上についての流れごとの分布の変化が示されている。逆流が大きくなるとともに分布はやや右上へ向って大きく広がるようになる。図中の破線は式 (1) と (2) から F' を消して $H_{1/3}$ と L_m の関係と

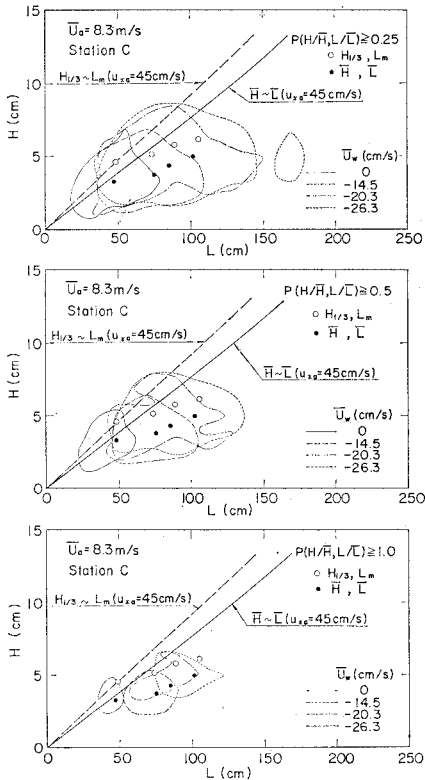


図-4 波高と波長の結合確率密度 ($\bar{U}_a=8.3$ m/s, C点)

して示したもので、次式で与えられる。

$$H_{1/3} = 0.0197 \frac{u_{*a}^2}{g} \left(\frac{u_{*a} f_{0m}}{g} \right)^{-1.89} \quad (4)$$

f_{0m} は式 (3) を用いて容易に L_m に変換できる。

式 (4) の $H_{1/3}$ は波のパワーから求めたものであり、ゼロアップクロス法による有義波高とは厳密には異なる。そこで、ゼロアップクロス法による平均波高と平均波長との比較をする意味で以下のように考える。

Mitsuyasu⁴⁾によれば、有義波周期 $T_{1/3}$ とスペクトルのピーク周波数 f_m には次の関係が成立する。

$$T_{1/3} = 1/(1.05 f_m) \quad (5)$$

また、平均波高 $\bar{H}$ 、平均周期 $\bar{T}$ と有義波とはブレットシュナイダースペクトルの次の関係が成り立つものとする。

$$\bar{H} = 0.625 H_{1/3}, \quad \bar{T} = 0.9 T_{1/3} \quad (6)$$

さらに、平均周期 $\bar{T}$ に対応する周波数を $\bar{f}$ とすると、次の関係が成り立つ。

$$\bar{T} = 1/\bar{f} \quad (7)$$

式 (5), (6), (7) から f_m が次のように求まる。

$$f_m = \bar{f}/1.17 \quad (8)$$

平均周波数 $\bar{f}$ と、それに対応する平均波長 $\bar{L}$ との関係は式 (3) の f_{0m} と L_m の関係と同じであるから、式 (1), (2), (6), (8) を用いると $\bar{H}$ と $\bar{L}$ の関係が次のように求まる。

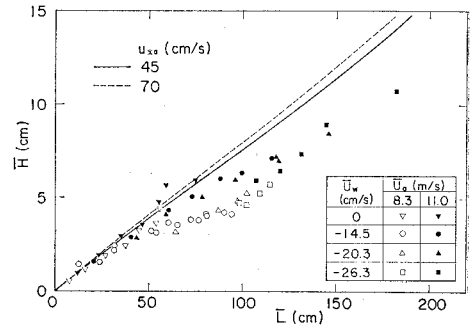


図-5 $\bar{L}$ と $\bar{H}$ の関係

$$\bar{H} = 0.0165 \frac{u_{*a}^2}{g} \left(\frac{u_{*a} \bar{f}}{g} \right)^{-1.89} \quad (9)$$

$$\bar{f} = \frac{1}{L} \left\{ \left(\frac{gL}{2\pi} + \frac{2\pi T_1}{\rho L} \right) \tanh \frac{2\pi h}{L} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

$h/L \geq 1/2$ とし、 $T_1=0$ とすると式 (9), (10) は

$$\bar{H} = 0.0937 H_*^{0.055} \bar{L}^{0.945} \quad (11)$$

となる。ここに、 $H_* = u_{*a}^2/g$ である。

図-4 中の実線は式 (9) と (10) の関係を示している。なお、図中の白丸はクロススペクトル法による実測の $H_{1/3}$ ($=4\sqrt{\eta^2}$) と L_m を表し、黒丸はゼロアップクロス法による $\bar{H}$ と $\bar{L}$ の実測値を表している。破線にある白丸は流れなしのケースで、実測値が式 (1) と (2) で表されることを示している。しかし、流速が大きくなってくると、実測値は破線からはずれる傾向にある。これは、波長の増加に比べて波高の増加の割合が式 (1) と (2) で表される関係よりも小さくなっていることを示している。したがって、逆流の流速が大きくなってくると、波形勾配 (H/L) が式 (1), (2) で得られるものよりも小さくなるということがわかる。

図-5 はいろいろなケースのゼロアップクロス法による $\bar{H}$ と $\bar{L}$ の関係を示したもので、 $u_{*a}=45$ cm/s ($\bar{U}_a=8.3$ m/s) と 70 cm/s ($\bar{U}_a=11.0$ m/s) の場合について式 (9), (10) の関係も示されている。 $\bar{L}$ の小さなところでは、式 (9), (10) の関係がよくあてはまるが、 $\bar{L}$ が大きくなると $\bar{H}$ はあまり増加しなくなり、さらに $\bar{L}$ が大きくなると $\bar{H}$ が再び増加を始める傾向が見られる。このことを逆に言えば、波がある程度発達すると、砕波等によって波の発達は押さえられて波高が増大できなくなるところが生じる。しかし、さらに流速を増してゆくと波高よりもまず波長が増加し始め、ある程度波長が大きくなると、また波高の発達が始まる。流れの中での風波は、このようなステップをくり返ししながら大きくなるものと考えられる。

(3) 波高の減少と波群の形成およびその伝達特性

(2) で述べたような波の発達の多様性を調べるためには、フェッチの長い風洞水路で実験すればよいが、この

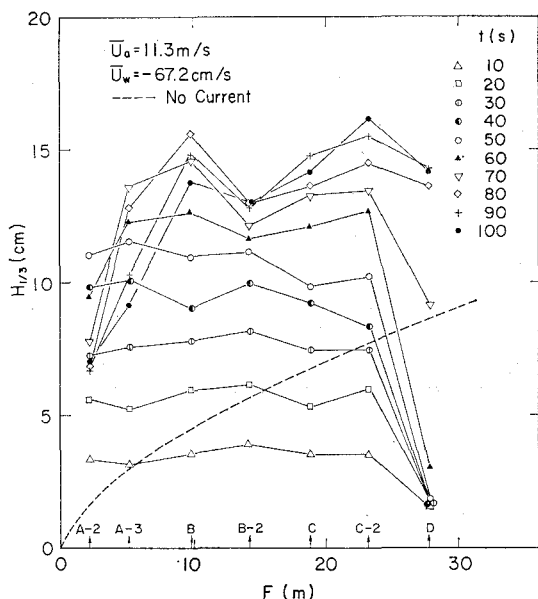


図-6 $H_{1/3}$ のフェッチごとの変化

目的のためには測定部の長さが 28.5 m の当所の風洞水路でも十分とは言えない。そこで、もう一つの方法として流速をかなり大きくして、急速に波を発達させることが考えられる。

図-6 は平均流速を 67.2 cm/s、風速を 11.3 m/s とした場合の波高のフェッチに対する発達を、風のかけ始めから 100 秒後まで 10 秒間ずつ区切って見たものである。なお、測定値は非定常性が強いために、原則として同一の条件で 3 回の測定を行っている。さらに、各測定断面においては水路中央と、中央から左右 50 cm ずつの 3 点で測定しているので、図中にプロットされた値は合計 9 回の測定値のアンサンブル平均をとったものである。図-6 によれば送風開始直後からほぼ全フェッチにわたって波は一樣に発達を始めるが、波がかなり大きくなってくると、B-2 点付近で波高が減衰を始める。これは、波が碎波しているために起こったもので、目視の結果とも一致する。なお、図中の破線は流れのない場合の同一の風速条件における波高の発達を示したものである。

このように逆流中での波の発達は単調ではないことがわかり、(2)での推測が裏付けられたことになる。しかし、碎波がどのような条件のもとで起こるかについてはまだ検討中の段階であり、ここでは定性的な結果の提示にとどめる。

図-7 は C 点の断面中央でレーザー・ドップラー流速計を用いて測定した流速分布の一例である。測定に際して、波のトラフレベルより上では測定時間を 320 秒とし、それより下では 160 秒とした。

流れのみの場合の流速分布はほぼ次の 1/7 乗則に従っ

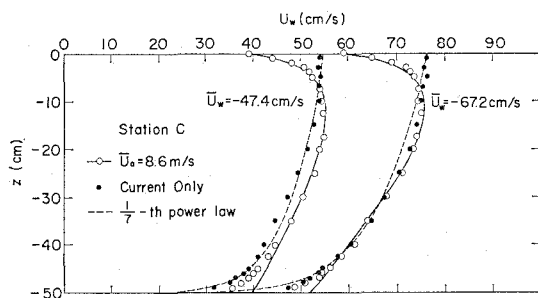


図-7 平均流速分布 (C点)

ている。

$$U_w(z) = u_0 \{(h+z)/h\}^{1/7} \quad (12)$$

ここに、 u_0 は表面流速で、 z 軸は静水面上を 0 とし、鉛直上向きを正としている。

風がかかった場合の流速分布は次の対数分布式をあてはめている。

$$U_w(z) = u_0 - U_r \ln \{(z_0 - z)/z_0\} - bz \quad (13)$$

ここに、 z_0 は水面での粗度高さで、 U_r , b は実測から求まる定数である。これまでの測定例から、 z_0 は一定で 0.01 cm 程度ととられることが多い。しかし、今回は波の発達が大きくなり、フロートで表面流速を測定するのがかなりむずかしくなり精度上も問題が出てくる。そこで静水面における流速もレーザー・ドップラー流速計で測定し、全体の流速分布に合うように z_0 , U_r , b を決めた。図-7 の実線はこうにして求めたパラメータを使って式 (13) を実測値にあてはめたものである。

この場合、 $\bar{U}_w = -47.4$ cm/s のケースで、 $z_0 = 1.35$ cm であった。

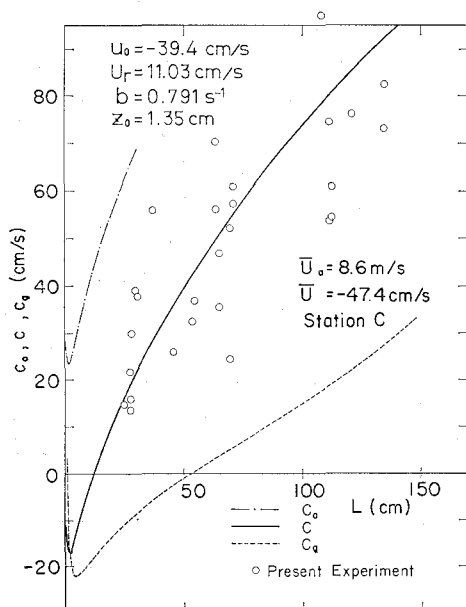


図-8 波速と群速度 (C点)

このようにして流速分布が決定されれば、Kato⁵⁾の方法により流れの中での波速 C が計算できる。そうすれば、波の群速度 C_g が通常用いられる次の定義式で求められる。

$$C_g = \frac{d\sigma}{dk} = \frac{d}{dk}(kC) \quad \dots\dots\dots (14)$$

図-8は図-7の $\bar{U}_w = -47.2 \text{ cm/s}$ で $\bar{U}_a = 8.6 \text{ m/s}$ の風がかかった場合の流速分布に対応する波速 C と群速度 C_g とを計算して波長の関数として示したものである。図中には参考のために流れのない場合の波速 C_0 も示されている。図中の白丸は風のかけ始めから発達する波をモータードライブカメラで約 1/3 秒毎に写真に撮り、その写真から波長と波速を読み取ってプロットしたものである。画面の中には1秒で1回転する時計が同時に写し込まれていて、コマとコマとの間の撮影時間間隔を 1/100 秒単位で読み取って波峰の移動距離から波速を求めている。実測値にはかなりのバラツキが見られるが、計算値はほぼ妥当な値を与えられと考えられる。

逆流上での波は図-3に示したように、波群として進行しながら発達あるいは減衰する性格が強いので、波群の伝播特性についても調べておく。

波の wave group 特性を調べるために、波の連なり状態を表す Smoothed Instantaneous Wave Energy History (略して SIWEH) を求める⁶⁾。

SIWEH は次式によって定義される。

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) Q(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$Q(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/T_p, & -T_p \leq \tau \leq T_p \\ 0, & \tau < -T_p, \tau > T_p \end{cases} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここに、 T_p はスペクトルのピーク周期、 τ はタイムラグ、 $Q(\tau)$ はデータウィンドウである。ここでは SIWEH の細かな変動を少くして見やすくする目的で、実測のパワースペクトルから得られた T_p の2倍を T_p として与えて式(15)、(16)を計算している。

図-9は図-3に対する SIWEH の変化図である。また、C点での波速は図-8に示されている。C点での波の波長は 120~140 cm 程度なので、図-8から $C_g \approx 20 \sim 30 \text{ cm/s}$ と読みとれる。図-9には波群の伝播を曲線で示してあるが、この傾きから求まる波群の速度もほぼ 20~30 cm/s 程度で、これらの波群は群速度で進行しているのがわかる。

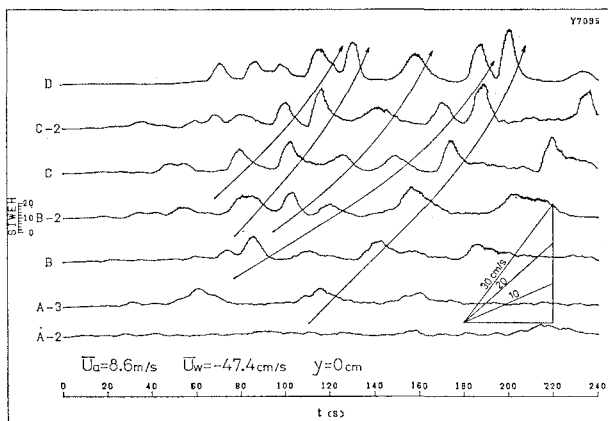


図-9 SIWEH の時間変化

5. あとがき

逆流中での波の発達は単調ではなく、流速が大きくなるかフェッチが大きくなることによって波の発達が極限に達し、そこで碎波によって波高の減衰が生じ、そこから新たに発達を始めることがわかった。また流れの中においても波群のエネルギーのピークは群速度で進むことがわかった。これらのことをふまえて、今後は碎波がどのような条件のもとで生じるかを調べ、碎波も考慮に入れた波の発達の式を求めたいと考えている。

最後に、実験の実施と図面の作成には水理研究室の松延嘉國技官の助力を得ている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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(1)，港湾技術研究所報告，第9巻，第3号，pp. 59~87, 1970.
- 2) 加藤 始・鶴谷広一・土肥俊満・宮崎 豊：流れの中の風波についての実験的研究(第2報)，港湾技術研究所報告，第15巻，第4号，pp. 3~48, 1976.
- 3) 加藤 始・鶴谷広一・寺川博也：流れの中の風波についての実験的研究(第3報)，港湾技術研究所報告，第20巻，第3号，pp. 93~129, 1981.
- 4) Mitsuyasu, H.: On the growth of the spectrum of wind-generated waves (I), Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Vol. 16, No. 55, pp. 459~482, 1968.
- 5) Kato, H.: Calculation of the wave speed for a logarithmic drift current, 港湾技術研究所報告，第13巻，第4号，pp. 3~32, 1974.
- 6) 岩垣雄一・間瀬 肇・北口直紀：Wave Group を考慮した不規則波のシミュレーションとその特性，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 55~59, 1982.