

流れを遡上する波の特性に関する実験的研究

東北大学工学部 正員 工博 岩崎敏夫

東北大学工学部 学生員 ○佐藤道郎

東北大学工学部 学生員 工藤奎吾

1. はしがき

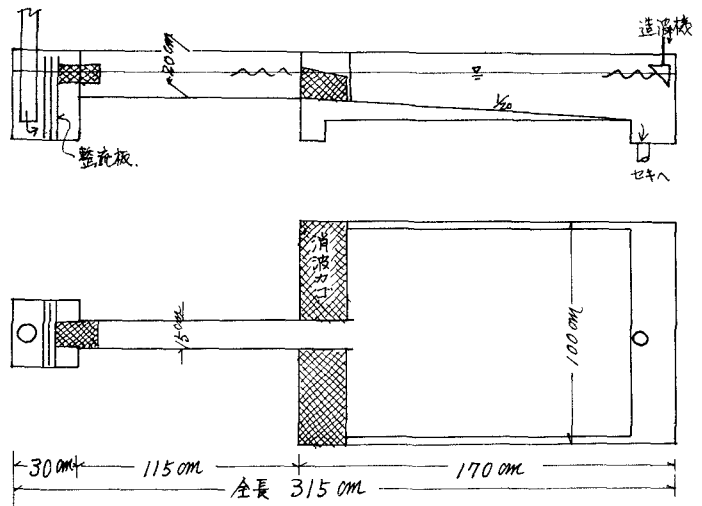
流れに外部からエネルギーが与えられて波が発生したり あるいは河口のような流れのあるところに沖から波が侵入してくる場合のように 表面波に流れの作用が加わると波は流れのないときよりもその特性が変化する。この問題に関しては 従来理論的にはかなり細かく取扱われてきたが それに比して実験的な研究はあまり多く行われていないようである。

この研究は (1) 流れの上を波が伝播するときの波高変化について。 (2) 流れに対して一定の造波作用によってエネルギーを加えたときに発生する波について。 (3) 河口域のように流れが拡散しているような水域を波が遡上するときの波高分布及び河川部に侵入する波について。

の3点につき実験によって調べ あわせて既往の理論との比較検討を若干試みたものである。

2. 実験装置および測定器

実験に使用したのは総プラスチック製の水路付造波水槽で右図のように1.15m の水路部分と幅1m, 長さ1.70mの水槽を主体とし水を取入れる為の小水槽と排水管および流量調節用のバルブから成るものである。水槽部分の底は $1/20$ の勾配をもち 端にはフランジタイプの造波機が取り付けられている。又、三ヶ所に消波用のカゴを設置した。これは反射波の影響を減らす目的で



金網のカゴにセロハン屑をつめたものである。測定器具については まず波高測定には抵抗線式水面計を用いた。これは水中にある二本の白金線の抵抗が水面の変動に伴い変化してそれによる電流変化を増増してペン書きオシロに書かせるものである。波長の測定には写真判定によった。流速は水槽内の流速はカレント・メーターにより、水路として使用した場合の流速はポイント・ゲージで水深を測り、セキの流量から平均流速として求めた。なお(1),(2)の実験では、水槽内にプラスチック製のパネルを立て水深の一樣な あるいは $1/20$ の底勾配をもつ二次元水路として実験した。波高の測定に際して 測定範囲は、造波機のタイプによる影響の無くなると思われるおよそ三波長以上離れたところから 水路部では消波カゴの影響で流れが流速に応じていくらか変っている為 約40cm程離れた箇の部分である。(1),(2)

の実験については10cm間隔で定常状態になったと思われるとき20波以上測定し平均をとった。(3)では水槽内に5~10cm間隔で流心では常に200 矢の波高を測定した。なお実験波によつて消波カゴで十分消波できず10%程度の反射があり、これはあまり周期が短いような場合(本装置では0.3秒以下)、又周期が長い時(水槽部では0.5秒を超えるとき)で周期が長いときには消波カゴの長さを大きくすることによつて消波も可能と思われるが水槽内の実験に使用できる部分も狭くなつてくるため実験に用いた波は0.3~0.5秒の波である。水深は8cm(水路部)~14cmで、多くは10cmで実験した。流した流量は0~35ℓ(最大)で、実験の種類にもよるが最高24段階にわけて流量を流した。

3. 実験目的について。

(1) 流れの上を波が伝播するときの波高変化について。

既に運動をしている流体に対して波が起されたような場合に、粘性、乱れ、流速分布といった流水の様々な特性の影響で、伝播と共に波の運動が変わつてくつて思われる。そこで水深が一様で単流と見なすことのできる流れを伝播する場合、水深だけが変化して断面ごとに流速が変化するように流れを伝播する場合、についで、その波高変化を調べる。後者のようなケースに対しては Longuet-Higgins と Stewart⁽¹⁾⁽²⁾によつて流れの速度勾配に応じて波の Radiation Stress に対して流れが仕事をを行なうことから、波と流れの間にエネルギーの授受によつて波高が変化し、静水域や流れの弱いところから強いところに向つて波が遊上するような場合には、次第に波高が増大することを理論的に示した。そこで、あわせてこの理論と比較検討を試みようとするものである。

(2) 流れに対して一定の造波作用によりエネルギーを加えたとき発生する波について。

一樣な流れのある水面に長時間風が吹いたりして波が発生するような場合、波の流れに対する位相速度と流れの速度が変わつて静止系から観測した波の位相速度は変化し、周期が変わらないが波長の伸縮が生じて波高の増減が起る。そこで流れの表面に造波機で波を起したときに発生する波が、流速によつてどのように異なるかを調べようとするものである。

(3) 河口域のように流れが発散しているような水域を波が遊上する場合の波高分布及び河川部に侵入する波について。

河口のように水深が有限で流れと波が共存しているところでは、それらの挙動は河口閉塞 といった問題と大きく関連をもつことを考えられる。そこで、こういった流れが発散しているようなところでは波が侵入して後、どのように変化して河川部に侵入していくかということについて三次元的に調べてみようというものである。

4. 理論

U なる流速をもつた流れがあつて、その表面を流れに対する位相速度 C で、波長 L 、波高 H の波が進行する場合を考える。流速 U のときの値を基準として C_0 、 L_0 、 H_0 とすれば、周期は変わらないから $T = T_0 = L_0 / C_0 + U = L / C + U$ より $X_0 = \tanh \frac{2\pi H_0}{L_0}$ 、 $X = \tanh \frac{2\pi H}{L}$ とすると $\frac{C}{C_0} = \frac{C+U}{C_0+U} \frac{X_0}{X}$ となり

$$U = U_0 \text{ で } \frac{C}{C_0} = 1 \text{ から } \frac{C}{C_0} = \frac{1}{2(1+\gamma)} \frac{X}{X_0} \left\{ 1 + \sqrt{1 + 4 \frac{X_0}{X} \frac{(1+\gamma)U}{C_0}} \right\} \quad \gamma = \frac{U_0}{C_0} \quad (1)$$

となり、深水波で、流れのないときを基準にとれば

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + 4 \frac{U}{C_0}} \right\} \quad (2)$$

$\sqrt{\quad}$ の中は $-U > \frac{1}{4} \frac{X}{X_0} \frac{C_0}{1+\frac{U}{C_0}}$ 、あるいは深水波で $-U > \frac{1}{4} \frac{C_0}{1+\frac{U}{C_0}}$ で負とな、 $\frac{C_0}{1+\frac{U}{C_0}}$ の解は存在しない。これは何い流れの速さがある値より大きくなると波は流れを逆上し得なくなることを示す。深水波では $U_0 = 0$ のときの波速 C_0 の $\frac{1}{4}$ になると流れを波は逆上しないことになる。波はもっと弱い流れから波形が崩れ、減衰が激しくなる。

$$\text{波長は } L = (C+U)T = \frac{C+U}{C_0+U_0} \cdot L_0 \quad (3) \quad \text{となる。}$$

波高変化に関しては理論的な扱いがいくらか複雑となる。従来の理論では波のエネルギー α 伝達量が不変であるという考えに立つもので、流れの乱れや粘性によるエネルギー損失は無視されており、実際に流れを伝播する波の波高変化に対してこれらの影響が無視し得る程度のものであるかどうかについては問題があると思われる。

流速が場所的に変化するような流れを波が伝播するとき、流速変化に応じて波高の変化を Longuet-Higgins と Stewart は次のような理論で与えた。

空間に固定されたある鉛直面 $x = \text{const}$ を通過するエネルギー α 輸送割合は単位時間当たり

$$R_x = \int_{-h}^{\eta} (p + \frac{1}{2} \rho \mathbf{u}^2 + p g z) u dz \quad \mathbf{u} = \mathbf{v} + \mathbf{u}' \quad (4)$$

$\mathbf{u}'$ は波動による水粒子速度で時間的 averages は 0 である。 R_x は最終的に、

$$R_x = E(Cg+U) + S_x U + \frac{1}{2} \rho h U^3 \quad U' = U + E/cph \quad (5)$$

となり、それぞれ、波のエネルギー α 静止系から見た群速度での輸送、Radiation Stress S_x に対して流速 U のなす仕事、もと α 流れと波の進行方向に E/cph で表わされる質量輸送速度が加わった流れ自身もつエネルギー α 輸送をあらわしている。Radiation Stress S_x は

$$S_x = \int_{-h}^{\eta} (p + \rho U^2) dz - \frac{1}{2} \rho g h^2 = E \left(\frac{X_0}{C} - \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

で定義される量で、物理的には波の存在によって生じた運動量の余分な流れで、流体に働く一種の非等方性の力である。(細かいことについては(2),(3)参照)。

幅が一定で水深だけが変化する場合、つまり $\partial R_x / \partial x = 0$ のとき波のエネルギーの連続条件は

$$\frac{\partial}{\partial x} [E(Cg+U)] + S_x \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

となり(これは直観的に得られず(4)に詳しい議論がされている)。E が h^2 に比例することから、これを解けば波高変化がわかるが、深水波の場合を除いて解析的に解くのは困難である。深水波の場合、

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_0(C_0+2U)}{C(C+2U)}} \quad (8)$$

水深が一定で流れが平面的に拡がって流速が変化する場合は、

$$\frac{\partial}{\partial x} [E(Cg+U)] + \frac{\partial}{\partial y} [EY] + S_x \frac{\partial U}{\partial x} + S_y \frac{\partial U}{\partial y} = 0, \quad S_y = E \left(\frac{C_0}{C} - \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

から、連続方程式 $\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0$ を使い $\frac{\partial E}{\partial y} = 0$ を仮定して、深水波 α のとき

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C(C_0+2U)}{C_0(C+2U)}} \quad (10)$$

きわめて浅いと

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_0+U_0}{C+U}} \quad (11)$$

となる。

ところで、実験(2)におけるような場合の波高変化はまた別なものとなる。富永⁽⁵⁾によれば、深水波を考へ、流速が一様な流れに、その一部に周期的圧力 p_a が、例えば $p_a = p_0 \sin \omega t$ のごとく与えられる場合に、流れに発生して伝播していく波の流速に応じた変化は次の式で表わされる。 $U_0 = 0$ と基準とし

$$\frac{H}{H_0} = \frac{2}{1 + 4\frac{U}{C_0} + (1 + 2\frac{U}{C_0})\sqrt{1 + 4\frac{U}{C_0}}} \quad (42)$$

5 実験結果および考察

実験結果については 現在データを整理中であるため詳細は講演当日報告するか 実験をとおして観察されたことを大まかに述べる。

(1)に關しては、一様水深としたときも、 $1/60$ の底勾配があつて流れが変化し弱くなるような場合も迎上する波は発生源からの距離が大きくなる程、波高は小さくなる傾向にあった。

(2)に關して、流速が大きくなると上流に向つて発生した波は波高が増大し、浅水比が大きくなる程大きくなるようである。例えば $h/L = 0.27$ で浅水表面波とみなされる波では 流れが無いときの流速 C_0 と 流れの速さ U との比が 0.18 位で 波高は流れがないときの 1.6 倍程度になった。しかし、流速がある程度大きくなると発生した波はすぐ崩れ、上流に向つて急速な減衰を示した。又、増大する部分で深水波とみなされる波についてみると、その変化は (42) で与えられるものより小さめである。(1)とあわせて考えると、こういった実験では、波高を発生源からの程度離れた点で測定するのによつても異なるように思われる。

(3)に關しては 流心部では波の位相速度が小さくなり流れの弱い部分より遅れるため峯線は曲り、あたかも河口に向つて波が集中していくようである。また、河川部に侵入する波が、河川部の流速に応じてどう変化するか調べてみたところ、流れが無いときの流速 $\alpha/6$ 程度の流速までは 流速の増大に伴い急速に増大し、二倍程度にまでなる波と、逆に減少していきただけの波とあり、流速が大きくなると 用いた実験水槽では造波機部分の流れも実際上零と見なすことはできず (2)の結果を考慮して考えねばならず 又、造波機部分の壁などによる流れの反射などの影響もあり十分流れが散散せず大まかな様子を觀察するにとどまった。

6. あとがき

本研究では まだ資料も十分でなく、現象に対しては、きり言い得るものは得られなかつたが、今後とも絶つてこの問題の解明に努めていく。現在までの理論は、流れの特質の見積りがおまじりなされておらず 流速分布の影響、Radiation Stress の影響といったものまでには考慮に入れられぬ計算がされているが、粘性、乱れによる影響を組み入れるまでには至っていない。

参考文献

- (1) M.S. Longuet-Higgins and R.W. Stewart; Changes in the form of Short gravity waves on long waves and tidal currents, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 8, 1960.
- (2) " " ; The changes in Amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 10, 1961.
- (3) " " ; Radiation stresses in water waves; a physical discussion with application, Deep-Sea Research, 1964, Vol. 11.
- (4) G.B. Witham; Mass Momentum and Energy Flux in Water Waves, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 8, 1960. 1963.3.
- (5) 富永政英 ; 流れと波について; 海岸災害研究ニュース, 海岸災害総合研究班 第6号.