

河口閉そく機構に関する基礎的研究 (第1報)

榎 木 亨*

1. 緒 言

従来、特定地点の河口形状、河口漂砂の性状に関して数多くの報告が出され、また河口の水理に関しては感潮河川としての水理学的な研究も比較的早くから研究されている。さらに河口閉そく機構解明の上に重要な問題点である波と流れの共存系における研究も Unna¹⁾, Johnson²⁾ にはじまるエネルギー保存の観点から取り扱った研究から、一様でない流れにおける波の変形に関する Longuet-Higgins & Stewart³⁾, Hunt⁴⁾, Sarpkaya⁵⁾, 浜田^{6),7)} らの新しい進んだ理論まで多くの研究論文が発表されており、昨年度の文部省科学研究による海岸災害総合研究班のシンポジウムの研究課題にもとりあげられて、多くの人々にとって、興味深い研究課題となっている。

しかしながら、これらの現在の理論ははなはだ難解であるとともに、一様水深における波と流れの共存下の議論であり、河口閉そくをもたらす漂砂移動を論じるにあたっては傾斜海浜での流れによる波の変形が重要な要素と考えられる。そこで本論文においては、やや古典的な取扱いと考えられる Johnson²⁾, Yi-Yuan⁸⁾ の方法を拡張して水深変化のある場合の流れの波におよぼす影響を解析して、河口近傍の漂砂移動をもたらす波の変形に関して実験結果と比較検討した。そして波速の流れにともなう変化によって生じる河口中心部への波の集中現象を明らかにして河口砂州発生 の推定を行なった。

もちろん、このような河口閉そく問題をとりあげる場合、以上のような河口の流出水と波との関連性のみが、漂砂移動を左右する因子でなく、北大の研究^{9),10)} によって指摘されたように、海水と淡水の二重水層、あるいは密度流も重要な因子と考えられるが、本論文では簡単に密度差のない場合の海中に直角に河川流が流出する場合のみについて検討したものである。

2. 河口流出水の拡散状況

1. で述べた流れにともなう波の特性の変化の議論をおしすすめる上に、河口部より海岸への河川流の流出状況を明らかにする必要がある。

この河口流出水の拡散現象についても比較的早くから平面噴流の拡散として Tollmien ら多くの研究者によっ

て研究されているが、その拡散機構および流速分布については、なお検討すべき点が残されているようである。

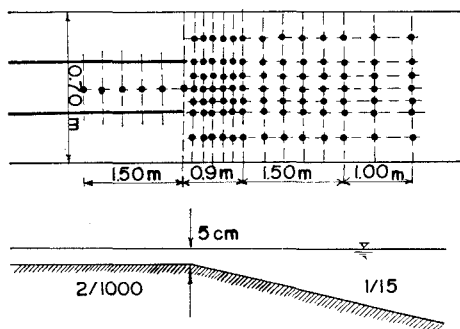
著者は河口から傾斜海岸への流出する場合を想定して以下に述べるような水深の変化する場合への流出状況を明らかにするための実験を行なった。

(1) 実験装置

実験水槽は $25 \times 0.7 \times 1.0$ m の波浪水槽に径 7.8 mm の循環管路を付置せしめたものを用いた。波浪水槽の上流端に幅 20 cm, 河川勾配 2/1000, 長さ 2 m の模型河川水路を設置し海浜勾配 1/15 の海岸部に接続させた (図-1 参照)。

流速はピトー管を用いて図-1 に示す箇所 で計測したが、各計測点で同時に垂直流速分布も測定した。実験流量は 2 l/sec, 3 l/sec, 4 l/sec, 5 l/sec で河口中心部の流出速度はそれぞれ 0.21 m/sec, 0.34 m/sec, 0.45 m/sec, 0.65 m/sec である。

図-1 流速分布測定箇所



(2) 流速分布

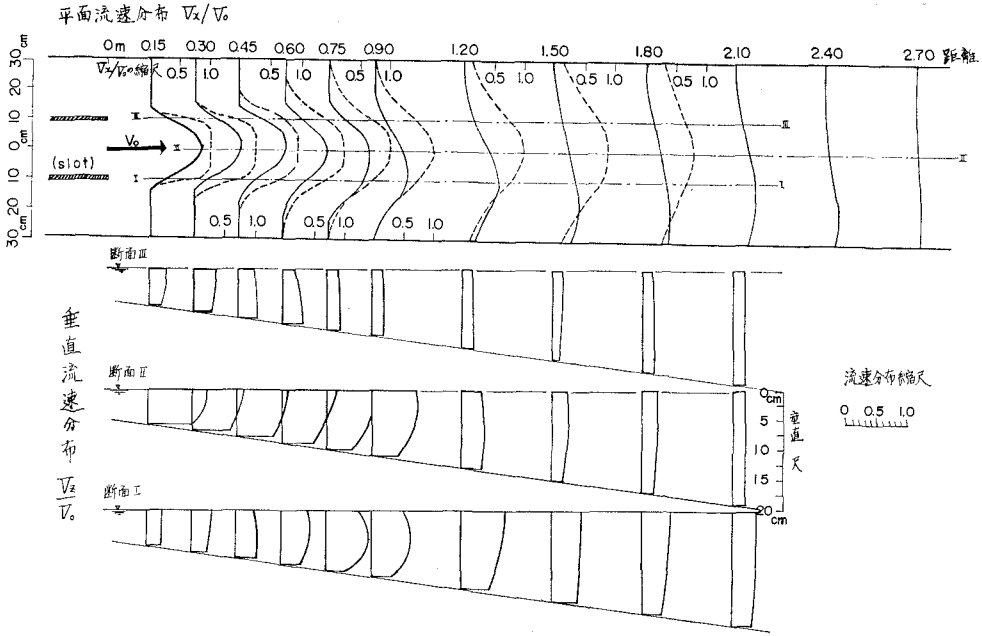
上記4種類の流速分布の平面分布、垂直分布の一例を図-2 に示す。

図-2 の平面流速分布において、実線は著者の実験結果点線は Albertson の公式¹¹⁾ にもとづく流速分布であるが、著者の実験結果 V_x は垂直流速分布の6割水深の流速 $V_{0.6}$ をとり V_0 は河口部中心の6割水深の流速をとって示してある。図-2 の実線で示す著者の平面流速分布は、測定点が粗いため明確に断定することはできないけれども、点線の Albertson の流速分布における山の平坦な部分 (河口流出速度が持続される領域) がほとんどなく、Albertson の流速分布曲線にくらべて全般に尖った形を示している。

図-3 はこの河口流出速度が維持される領域とその外

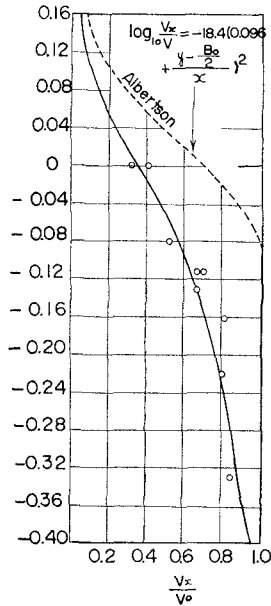
* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部

図-2 各地点の流速分布の一例 ($Q=4\text{ l}$ の場合)



$V_0=0.46\text{ m/sec}(Q=4\text{ l/sec})$

図-3 流速の拡散状況

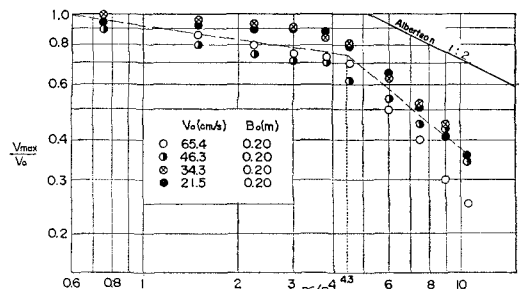


側の流れが拡散する領域 (この領域を Albertson は zone of flow establishment と呼ぶ) の流速分布を明らかにしたもので、著者の実験値にもとづく曲線は河口流出速度を維持する領域がなく中心線からすぐ漸次流速が減少していることを示している。この原因は河川部と海岸部の接合点において底勾配がことなるため、著者の実験における河口部の流速分布が Albertson らの河口部の初期流速分布と異にするためと、さらに海岸部の断面変化による効果ではなかろうかと考えられるが、明らかでなく今後の研究によって明らかにしたいと考えている。

つぎに各地点の最高流速の変化について考察してみよう。一般に最高流速は河口中心線上にあられるはずであるが、著者の実験の場合沖の部分では流れが偏向しているため、各地点の最高流速の変化を従来の研究と同様

の無次元表示をして対数紙にプロットしたのが図-4である。図-4における x は河口からの距離であり、 B_0 は河口幅である。potential core (河口流出速度を維持する領域) の保たれている領域は $V_{\max}/V_0=1$ であり、それから沖の部分 (確立流領域: zone of established flow) は 1:2 の勾配で $V_{\max}$ が減衰することは実線で示した Albertson の実験結果¹¹⁾ の他 Tollmien や京都大学の実験結果でも認められているが、図-4 からわかるように、海岸部が水平床でないという従来の実験と条件のことになった著者の実験の場合も $V_{\max}/V_0$ の距離にともなう変化が急変する箇所が見出される。この potential core の維持される限界は多くの研究者によってことなり、Albertson の結果によれば図-4 に示すように $x/B_0=5.2$ であり Tollmien¹²⁾ は $x/B_0=4.44$ 、京都大学の実験結果では x/B_0 は 4 以下という値がえられている。著者の実験結果では明確な potential core の領域はないが、先に述べた $V_{\max}/V_0$ の急変する点は $x/B_0=$

図-4 河口からの距離変化にともなう $V_{\max}$ の変化



4.3 という値がえられる。この境界点の相違の原因については、まだ十分明らかにされていないが、噴出部の R_0 数 $= V_0 B_0 / \nu$ の相違と著者の場合、海岸部の鉛直断面変化の2点が考えられる。このうち後者の断面変化の効果については、京都大学の実験の場合断面変化のない水平床の実験においても Albertson のえた $x/B_0 = 5.2$ という値より小さい値を示している、それほどいじりしい影響はないものと推定される。一方 $V_0 B_0 / \nu$ の値を Albertson と著者の場合とくらべてみると、Albertson の方は $V_0 = 122 \sim 550$ cm/sec と高速度であるが噴出幅は小さく、 $V_0 B_0 / \nu$ は $4360 \sim 19350$ と比較的小さい。一方著者の場合は $V_0 = 21 \sim 65$ cm/sec と低速度であるが $V_0 B_0 / \nu$ は $43100 \sim 131000$ と大きい値を示している。

この相違がさきに述べた境界点の相違に影響しているのではなからうかと考えられるが、さらにこの数の影響について実験を進めている。

つぎに potential core を保つ領域より沖側の領域の最高流速の変化は、さきに述べたように Albertson および他の研究結果が 図-4 において 1:2 の勾配をもって変化することを認めているが、著者の実験値は 1:1 $\sim$ 1:1.25 程度の急激な変化を示している。この原因もまだ十分な解析をしていないが 図-2 の垂直流速分布の変化から考えて鉛直断面の変化がいじりしい効果を与えるものと思われる。

以上河口から海部への底勾配の変化する場合の流れの拡散については、平面流速分布の形状、最高流速の変化の状況、いずれも水平床の拡散状況とは少しことなった様相を示しているようであって、第2報以下にこの流れの拡散の解析を行ないたいと考えている。

3. 浅海における流れにともなう 波浪特性の変化

(1) 波速の変化

1. で述べたように流水中における波についても多くの研究者によって解析されている。

著者の実験の場合、図-2 の垂直流速分布からもわかるように、分布形が一様な流速分布から河口部に近づくにつれて放物線分布に近づくが、その場所の変化にともなう流速分布の変化を考慮して解析していくことは困難であるので、ここでは Yi-Yuan⁸⁾ の取り扱ったように流速 V という一様な流れの中の波について取り扱うこととし、この流れの中の波も浅海波の性質をもっているものとして解析をすすめることとする。流水中の波の波速 C は微小振幅波理論を用いると、

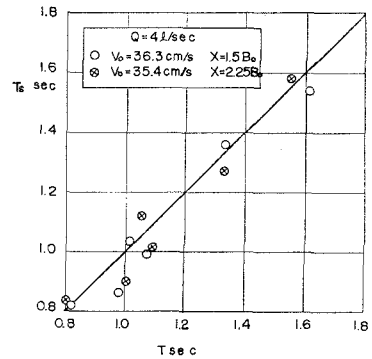
$$C^2 = (gL/2\pi) \tanh(2\pi h/L) \dots \dots \dots (1)$$

静水中を進行する波の波速 C_s も同様に、

$$C_s^2 = (gL_s/2\pi) \tanh(2\pi h/L_s) \dots \dots \dots (2)$$

で表わされる。ここに L は波長、 h は水深、添字 s は

図-5 T_s と T の比較



静水中の波の特性を表わす。

いま静水中の波の周期 T_s と流れがある場合の波の周期 T を比較してみると、図-5 に示すように流れによってほとんど影響がないようである。したがって波速、波長、周期の関係は、

$$T_s = L_s / C_s = T = L / (C + V) \dots \dots \dots (3)$$

で表わされる。

式 (1), (2), (3) より次式が導かれる。

$$\frac{C}{C_s} = \frac{Y}{2X} \left[1 \pm \sqrt{1 + 4 \frac{V}{C_s} \frac{X}{Y}} \right] \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

$$X = \tanh(2\pi h/L_s), \quad Y = \tanh(2\pi h/L)$$

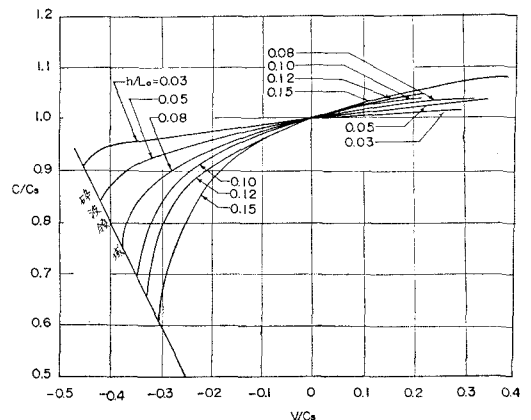
で流れがない場合、すなわち $V/C_s = 0$ のとき $C = C_s$ でなければならないから式 (4) の符号の正のみを採用する。式 (4) 中の X は底部の摩擦損失を無視すれば h/L_0 の関数で表わされ、一方 Y は、

$$Y = \tanh(2\pi h/L) \\ = \tanh[(2\pi h/L_s)(C/C_s + V/C_s)^{-1}]$$

と変形できるから V/C_s と C/C_s および h/L_0 の関数で表わすことができる。ここに L_0 は沖波の波長である。

図-6 はこの関係を求めたものであり、これによると河口部よりの向かい流れが大きくなるにつれて、流れのある場合の波速は遅れていく。この傾向は浅水比が大きいほど顕著に表われてくる。そして $-(V/C_s) =$

図-6 V/C_s , C/C_s と h/L_0 の関係



(1/4)(Y/X) になったときに波が砕けるようになる。

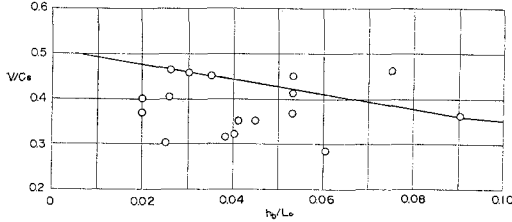
このときの V/C_s , h/L_s , C/C_s の関係として式 (4) および砕波条件式より、

$$C/C_s = -2(V/C_s) \dots\dots\dots (5)$$

$$V/C_s = \frac{1}{4} \frac{\tanh\{(2\pi h/L_s)(C_s/V)\}}{\tanh(2\pi h/L_s)} \dots\dots\dots (6)$$

が導かれる。式 (5) の関係は 図-6 で表わされているが、式 (6) で示される V/C_s と h/L_s の関係を示したのが 図-7 の実線で、同図に実験結果もプロットしてある。これによると一般に実験値は理論値より小さい値を示しているようであるが、これは底部摩擦の影響と理論値が微小振幅波として取り扱われたためと考えられる。

図-7 砕波時の V/C_s と h/L_s の関係



(2) 波高の変化

つぎに流水中の波のエネルギーの伝達速度は波の群速度 C_g と流水の速度の和と考え、摩擦損失を無視すると波のエネルギー保存則より式 (7) が成立する。

$$H_s^2 C_{gs} = H^2 (C_g + V) \dots\dots\dots (7)$$

ここに H_s は静水の中の水深 h における波高、 H は流れのある場合の波高である。

式 (7) により同じ水深における流れのある場合の波高とない場合の波高の比は次式で表わされる。

$$\frac{H}{H_s} = \sqrt{\frac{n_s}{n \frac{C}{C_s} + \frac{V}{C_s}}} \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) の n_s , n は次式で与えられる。

$$n_s = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h/L_s}{\sinh 4\pi h/L_s} \right)$$

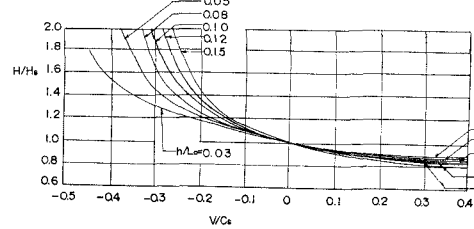
$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh 4\pi h/L} \right)$$

式 (8) の n をかきかえると流水中の波高変化は式 (9) で表わすことができる。

$$\frac{H}{H_s} = \sqrt{\frac{n_s}{\frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{(4\pi h/L_s)(C/C_s + V/C_s)^{-1}}{\sinh \left[\left(\frac{4\pi h}{L_s} \right) \left(\frac{C}{C_s} + \frac{V}{C_s} \right)^{-1} \right]} \right\} \frac{C}{C_s} + \frac{V}{C_s}}} \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) 中の n_s は前に述べたように h/L_s の関数であり、また C/C_s は式 (4) あるいは 図-6 で示されたように V/C_s と h/L_s の関数であるから、 H/H_s もまた V/C_s と h/L_s の関数で表わすことができる。式 (9) の関係を図で示すと 図-8 における曲線群がえられる。これによれば向かい流れの場合の方が追い流れの場合より

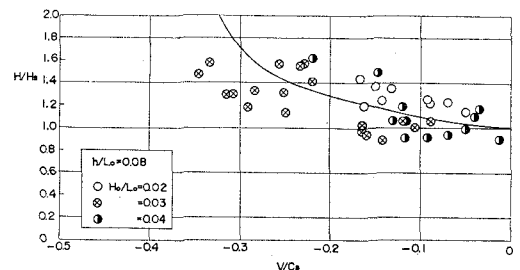
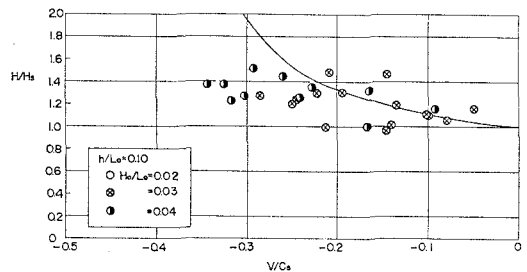
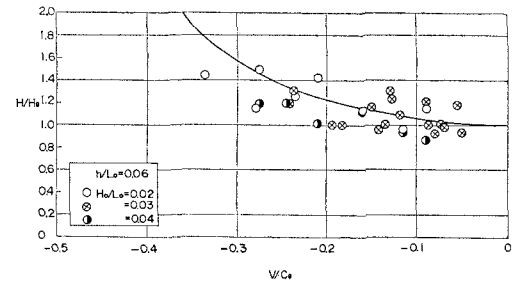
図-8 H/H_s , V/C_s と h/L_s の関係



波高変化に与える影響は大きく向かい流れが大きくなれば波高も増加する。また浅水比 h/L_s が大きいほどこの傾向はいちじるしく大きな値を示すが、図-7 からわかるように、実際にはこの理論的な砕波点より沖側で波は砕けて式 (9) に示す波高変化を示さない。

図-9 の一連の図は砕波前の波高変化に関する実験結果と式 (9) の理論値との比較をした図であって、多少のちらばりはあるけれども比較的良好に一致している。同図の実験結果は沖波の波形勾配別にプロットされているが、この表示法では波形勾配による差異は表われていない。しかしながら V/C_s が大きくなり、波が砕けやすくなると理論値より小さい方に実験値が表われてきていることは、砕波近傍では式 (9) は適用できなくなっていることを示している。

図-9 流れのある場合の波高変化の実験結果との比較

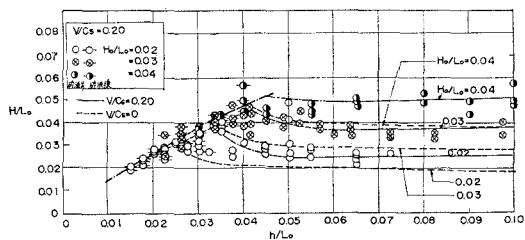


以上は波の碎波前の議論であるが、つぎに碎波後の波の変形について実験結果にもとづいて考察してみよう。

碎波後の波高変化を表わす場合、図-8あるいは図-9と同じ表示では、静水時の波高 H_0 の変化が十分に解析されていないため不適当と考えられる。したがって沖波の波長で波高を除いた無次元量 H/L_0 で表わすこととした。

図-10は $V/C_0=0.20$ の場合の水深変化にともなう碎波前と碎波後の波高変化を碎波前と碎波後で区別してプロットしたものである。図中の実線は図-8の理論曲線より求めたものであり碎波点近傍から碎波後の波高変化を示す鎖線は実験値を参照して著者が適当に描いた実験曲線である。同図に比較のため石原・岩垣・鈴木¹³⁾による流れのない場合の波高変化を点線で示した。碎波前の流れのある場合の波高が、ない場合の波高より大きいことは図-8からでも明かであるが、碎波後の波高変化を示す鎖線と碎波前の波高曲線との交点(碎波点)もまた、同じ波形勾配の波を比較すると流れのある場合の方が流れのない場合にくらべて深い水深を示し、その波碎波高も大きいことが明かになる。

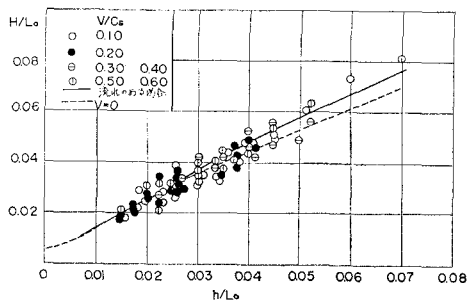
図-10 V/C_0 =一定の場合の水深変化にともなう波高変化



碎波前の場合は流れない場合もある場合も図-10では沖波波形勾配による相違が明瞭に表われているが、碎波後の波高変化には流れのある場合も波形勾配による相違は認められず、ほぼ同一曲線上にのるようである。しかもその曲線は流れのない場合の碎波後の波高変化を示す曲線とほとんどがかわらない。

図-11は碎波後の波高変化のみをとりあげて波形勾配の相違はないものとして V/C_0 別にプロットしたものである。

図-11 流速別の碎波後の水深変化にともなう波高変化



この図から碎波後の波高変化には V/C_0 の相違による差異は表われていない。また流れのない場合の実験曲線とも浅水比のところ多少差異があるようであるが、実験値のちらばりからみてほとんど変わらないものとみなしてよからう。

以上のことから碎波後の波高変化に関して流れの影響は碎波する場合の境界条件にはいちじるしく影響するけれども一度碎波した波の波高変化については流れの影響はないと考えてさしつかえないようである。

(3) 波の河口中心部への集中について

3.(1)で述べたように、向い流れの流速が大きいと波速は減少する。したがって流れのある領域は流れのない領域にくらべて波の峯線の遅れが生じるはずである。この波の峯線の遅れは一地点の波速の遅れによるだけでなく、流れが波速に影響してくる地点からその観測点までの累積した遅れとなって表われてくる。いま、ある観測線における平面的な波の峯線の形状をするためには、波の屈折図を作図する場合の波の峯線法(Wave Crest Method)と同様に、流れの影響のない領域から出発して適当な時間間隔をとって、その時間内に波の峯の各点がどれだけ進むかをしり、つぎにその進んだ地点における流れの流速 V と水深 h から図-6を用いてその地点の波速を求めて、つぎの適当な時間内に進む距離を算出していかなければならない。

このような作業を逐次くり返していくと、流速分布が図-2に示すように河口中心線上で最高で、中心線からはなれるにしたがって流速が減衰しているような河口流出水の流速分布の性状から、河口中心がもっとも波の峯の遅れが目立ってくるようになることは容易に推定することができよう。

図-12 計算による波の峯線形状の場所的な変化

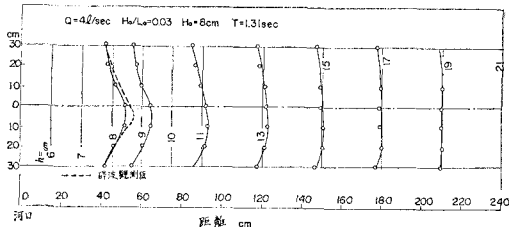


図-12は図-2に示した流速分布を用いて、上に述べた手法により逐次求めた波の峯線の場所的な変化を示す図である。

さきに波の峯線を求める手法の説明において適当な時間内に進む距離という言葉を用いたが、この適当な時間 $4T$ は細かくとればとるほど正確な波の峯線の形状を求めることができる。図-12では流速測定箇所が定まっているので、その箇所に波の峯線がくるように $4T$ を 0.30, 0.25, 0.15 秒と適当に選んで求めたものである。この $4T$ は波の峯線上の地点のものは同じ時間をとら

ねばならぬことはいうまでもない。

図-12 の場合は 図-2 で示す流速分布が沖の方で偏向しているので、波の峯線もひずんだ形で表われてくる。このような計算によって求めた波の峯線を碎波点における写真撮影による実際の波の峯とを比較したものを図-12 に同時に示す。図-12 の点線が写真撮影によってえられた結果であって、もっとも波の峯の遅れた箇所では実際の波では計算結果よりさらに 4 cm 程度遅れているが、これは計算が段階的な近似計算のためと考えられる。

以上のように波の峯の遅れは河口中心部でもっとも大きく、河口に向って凹形を示すようになる。波の進行方向は波の峯と直角であるから河口中心部において波の集中現象が生じる。すなわち沖の方では河口線に対して一様な入射角をもち、等深線が河口線に平行で地形による屈折がほとんどない場合でも、流れによって河口中心付近に波が集中し、それにしたがって海岸漂砂も河口中心に集中すると考えられる。このような現象が河口前面の砂洲形成の重要な要因となるものと推定されるが、このことについてはさらに移動床の実験を行なって研究を進めていきたいと考えている。

4. 結 語

河口閉そくという問題を解明するにあたってきわめて多くの諸要素がふくそうしているため、その個々の要素の影響を明らかにしていかなければならないが、その個々の問題が本文中でも述べたように複雑でその解析がむずかしい。

著者は今後さらに流れの拡散状況について検討すると

ともに、漂砂移動とこの波の変化および流れの変化とを結びつけて解析を進めていくつもりである。最後に実験に援助いただいた庄野、竹内大学院学生に感謝するとともに本研究が文部省科学研究費によって行なわれたことを付記しておく。

参 考 文 献

- 1) Unna, P.J.H.: Waves and Tidal Streams, Nature, Vol. 149, 1942.
- 2) Johnson, J.W.: The Refraction of Surface Waves by Currents, Trans. A.G.U., Vol. 28, 1949.
- 3) Longuet-Higgins, M.S. and R.W. Stewart: The Changes in Amplitude of Short Gravity Waves on Steady Non-uniform Currents, Jour. of Fluid Mechanics, Vol. 10, 1961.
- 4) Hunt, J.N.: Gravity Waves in Flowing Water, Royal Society of London, Series A, 1955.
- 5) Sarpkaya, T.: Oscillatory Gravity Wave in Flowing Water, Trans. A.S.C.E., 1957.
- 6) 浜田徳一・加藤 始: 流れをさかのぼる波についての一計算, 第8回海岸工学講演集, 1961.
- 7) 浜田徳一・加藤 始: 流水の中の有限振幅波の計算, 第10回海岸工学講演集, 1963.
- 8) Yu, Yi-Yuan: Breaking of Waves by an Opposing Current, Trans. A.G.U., Vol. 33, 1952.
- 9) 福島・柏村・八畝・高橋: 石狩川の河口構造, 第8回海岸工学講演集, 1964.
- 10) 福島・柏村・八畝・高橋: 石狩川河口の研究, 第11回海岸工学講演集, 1964.
- 11) Albertson, M.L., Y.B. Dai, R.A. Jensen and H. Rouse: Diffusion of Submerged Jets, Proc. A.S.C.E. Pap. No. 2409, 1948.
- 12) Pai, S.I.: Viscous Flow Theory II. Turbulent Flow. Nostrand Co.
- 13) 石原・岩垣・鈴木: 海岸堤防の設計, 特にその有効高さについて, 第2回海岸工学講演集, 1955.