

中予海岸における波浪変形の観測 (3)

——海底摩擦係数および流速——

柿沼忠男*・伊 福 誠**・井内国光***

1. 緒 言

著者らは、昭和 52 年から愛媛県伊予市森海岸を拠点として、沖側の水深 10 m に設置してある建設省の水圧式波高計および岸側に設置した愛媛大学の直記型水圧式波高計の 2 台の波高計により、冬春季節風時の波浪を記録してきた。

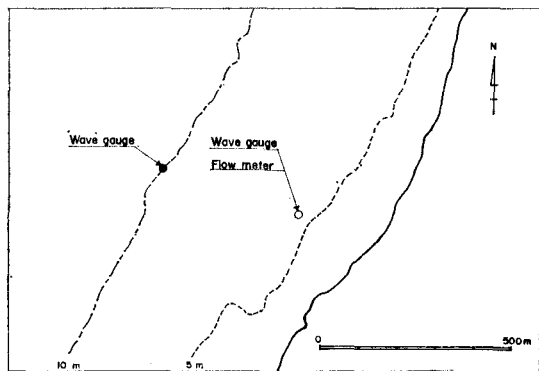
その間、昭和 53 年には、音響測深機や水中カメラなどにより、6 本の測線を出して観測海域の海底地形を探索し、ほとんど砂のない岩盤海岸であることを確かめ、その海底の粗度を算出して、現地海岸における海底摩擦係数に関する基礎的資料を得てきた¹⁾。

さて、こうした海岸波浪についてその変形機構をより明確にするためには、流れについての実態を知る必要がある。波浪による流れの研究は、理論的および実験的には、Stokes²⁾をはじめ、Longuet-Higgins³⁾、Russell-Osorio⁴⁾、Hung⁵⁾、Sleath⁶⁾ および Isaacson⁷⁾ らによりなされ、また、平山^{8),9)} は、進行波動中における単一粒子の残留速度の特性について水平床および斜面上において実験を行ない従来の理論との比較検討をしているが、現地観測に基づいた基礎的資料は、極めて少ないのが現状である。

この論文は、現地海岸における海底摩擦係数と相対粗度との関係を求めて波浪予知の精度向上に努めると同時に、水圧式波高計による波浪資料および電磁誘導型流速計による流速資料を解析して、現地観測に基づく、波浪による流れについての基礎的資料を得ようとしたものである。

2. 観 測 方 法

図—1 は、観測対象とした中予海岸付近図を示すもので、沖側の黒丸および岸側の白丸は、それぞれ、平均水深 10 m に設置した建設省の水圧式波高計および平均水深 6.5 m に設置した愛媛大学の水圧式波高計、電磁誘導型流速計 MODEL 551 (MARSH-McBIRNEY 社製)



図—1 観測位置図

の位置である。

3. 波浪資料および流速資料の解析

愛媛大学の水圧式波高計での、昭和 55 年 1 月 21 日 14 時～16 時 30 分までの波浪資料および 1 月 21 日 14 時～19 時、1 月 30 日 19 時～31 日 14 時までの流速資料を解析し、各種平均波の波高、周期、有義波の波形勾配、分散と圧力波および流速の skewness, kurtosis, パワースペクトルおよびバイスペクトルを求めた。なお、ここで得た分散, skewness, kurtosis および両スペクトルは、読み取り間隔 0.5 sec, 読み取り個数 1200 個で、愛媛大学のデジタルトレーサ OT-60 によって読み取り、九州大学の大型計算機および愛媛大学の計算機によって求めたものである。

4. 波浪資料および流速資料の解析結果

(1) 海底摩擦係数

前報¹⁾では、沖側と岸側での波浪資料の解析結果から、有義波法により、海底摩擦係数を算定し、1.55～7.86 の値を得た。また、海底粗度を、中予海岸において山～谷間の高さ、日吉津、二色の浜および高浜海岸において Kamphuis¹⁰⁾ に従って底質の 90% 粒径の 2 倍に取った結果は、いずれも、Jonsson¹¹⁾、梶浦¹²⁾ および Kamphuis¹³⁾ が半理論・半実験的に得た値よりも大きく、相対粗度が大きくなるにつれて、海底摩擦係数は小さくなり、似た

* 正 会 員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学教室

** 正 会 員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学教室

*** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

傾向を示し、さらに、中予海岸では、海底粗度を山～山の長さ (pitch)* に取った結果は、Jonsson の得た値に比較的よく一致することを得た。(* 前報訂正)

ここでは、前報で解析した波浪資料をもとに、Bagnold¹⁴⁾ の、底質が鉄、石英および石炭の場合の、セルロイド板に人工粗度を取り付けた振動流による実験結果、および本間・堀川・鹿島¹⁵⁾の碎波帯外での規則波による水平床上での浮遊砂に関する実験結果を、日吉津および二色の浜海岸で観測して得た波浪資料および底質資料にも適用して、海底摩擦係数と相対粗度との関係を調べた。

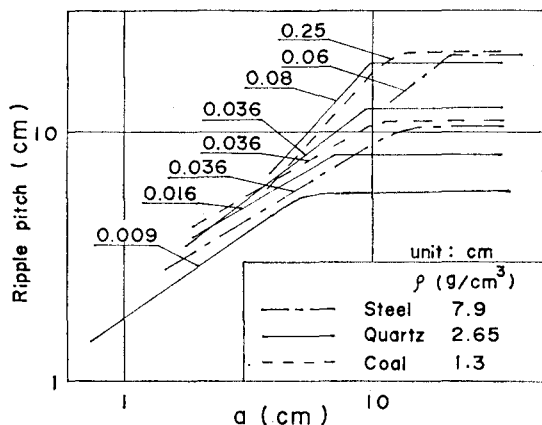


図-2 ripple pitch と a との関係¹⁴⁾

図-2 は、Bagnold の底質が、鉄、石英および石炭の場合の振動流による実験結果を示したものである。日吉津および二色の浜海岸において、汀線から沖合方向の、それぞれ、9 および 11 地点での底質資料^{16), 17)} から得た 50% および 90% 粒径の平均値は、0.017 および 0.031 cm と 0.033 および 0.103 cm である。図-2 中、砂とほぼ同一の密度を有する石英による結果を用いて砂漣の pitch を算出し、これを Nukuradse の相当粗度として、海底摩擦係数と相対粗度との関係を示したものが、図-3 (a) である。図中には、岩盤海岸である中予海岸において pitch を相当粗度とした結果¹⁾も記してあるが、日吉津および二色の浜海岸の 50% および 90% 粒径として、図-2 中で、それぞれ、0.016 および 0.036 cm, 0.036 および 0.08 cm の場合を適用した。

図中の角印および丸印は、それぞれ、50% および 90% 粒径の場合である。この図をみると、中予海岸のものは、Jonsson の曲線に比較的よく一致し、日吉津および二色の浜海岸のものは、50% および 90% 粒径の場合とも、多少のばらつきはあるが、Jonsson, 梶浦および Kamphuis の曲線に比較的よく一致しており、90% のそれは、梶浦および Kamphuis の曲線より小さめである。

図-3 (b) は、本間・堀川・鹿島の波による浮遊砂の実験結果をもとに、日吉津および二色の浜海岸での 50%

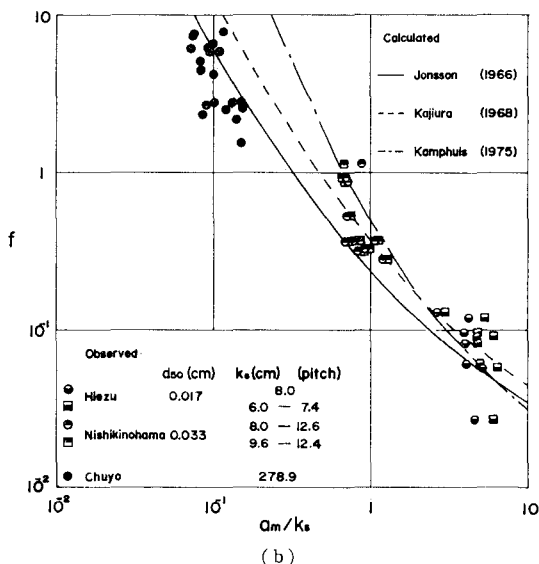
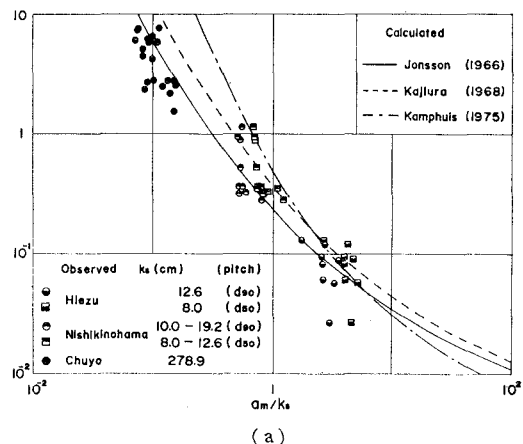


図-3 海底摩擦係数と相対粗度との関係

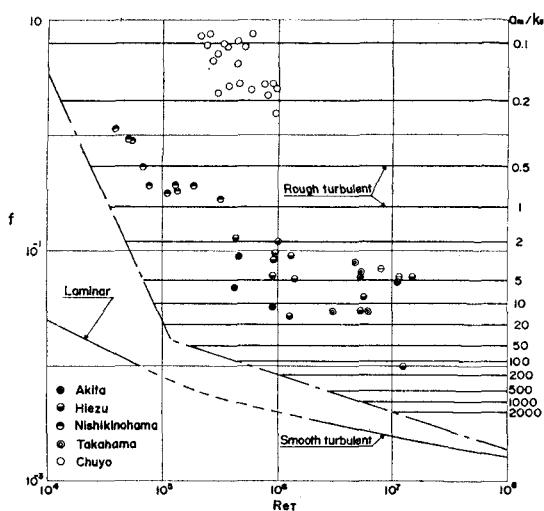


図-4 海底摩擦係数と波のレイノルズ数との関係

粒径から、砂漣の pitch を算出し、これを Nikuradse の相当粗度として、海底摩擦係数と相対粗度との関係を示したもので、図中には、Bagnold の実験から 50% 粒径をもとに得た結果も丸印で示してある。この図をみると、両者の実験装置は異なるが、観測結果は、三者の曲線にかなりよく一致していることがわかる。

図-4 は、海底摩擦係数と波のレイノルズ数との関係を示したものである。図中の実線、破線および一点鎖線は Jonsson¹⁸⁾ によるものである。図には、秋田海岸、高浜海岸での観測結果も示してあるが、この図をみると観測結果は、すべて rough turbulent の領域にあり、一点鎖線に沿い波のレイノルズ数が大きくなるにつれて、海底摩擦係数は小さくなるのがわかる。

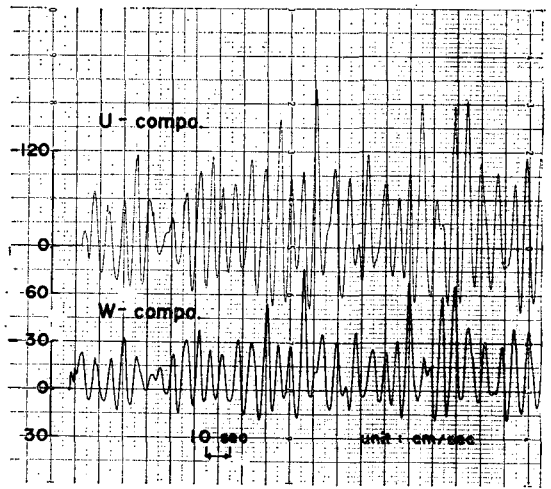


図-6 流速資料

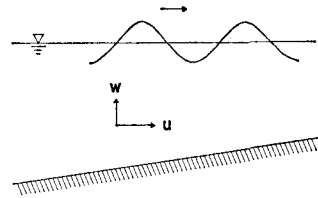


図-7 座標系

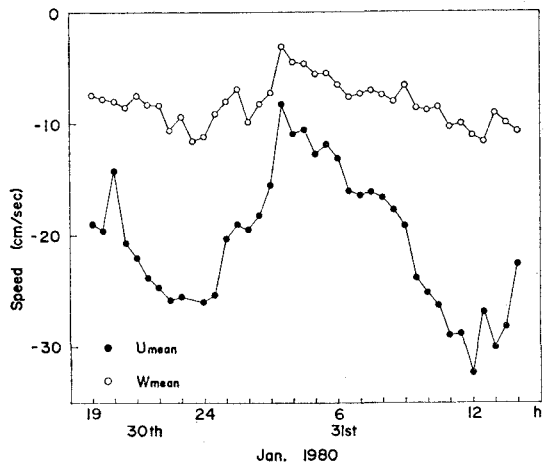


図-8 水平成分および鉛直成分の平均流速

型流速計で得た流速資料である。流速は、図-7 に示すように、水平成分および鉛直成分についてそれぞれ岸向きおよび上向きを正とし、水平成分は卓越波向 WNW と平行となるように流速計を設置した。

図-8 は、1月30日19時~31日14時の水平成分および鉛直成分の平均流速を示したものである。この図をみると水平成分および鉛直成分とも負の値、すなわち、岸から沖合および海面から海底へ向けての流れが大きく、鉛直成分は $-3.1 \sim -11.6$ cm/sec の範囲であるの

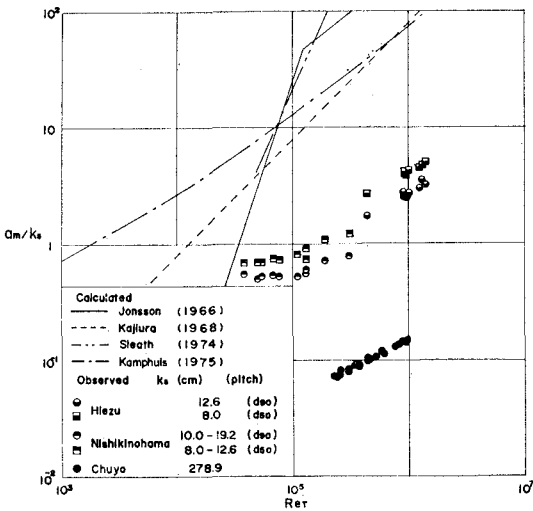
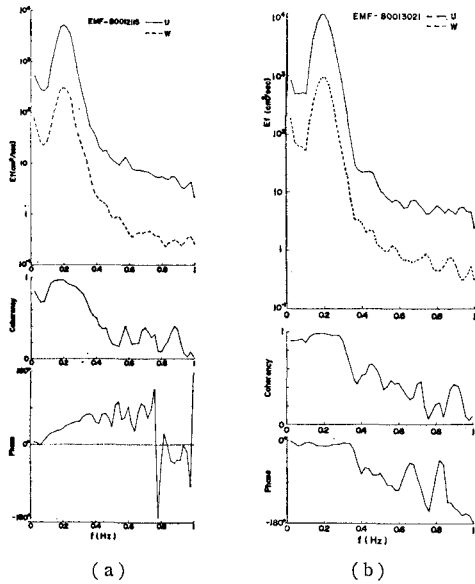


図-5 相対粗度と波のレイノルズ数との関係

図-5 は、相対粗度と波のレイノルズ数との関係を示したものである。図中には、Jonsson、梶浦および Kamphuis が半理論・半実験的に得た結果を、それぞれ、実線、破線および一点鎖線で、また、Sleath¹⁹⁾ が、水平床での層流の安定性を論じた実験結果を二点鎖線で示してある。各曲線の右下方が rough turbulent の領域であり、左上方は、層流、層流から乱流への遷移および smooth turbulent の領域である。この図をみると、50% および 90% 粒径をもとに、Bagnold の実験結果から得た砂漣の pitch を Nikuradse の相当粗度とした日吉津および二色の浜海岸での結果、音響測深機による海底地形の解析から得た pitch を Nikuradse のそれとした結果とも rough turbulent の領域にあり、波のレイノルズ数が大きくなるにつれて、相対粗度も大きくなっていることがわかる。なお、観測結果は、梶浦および Kamphuis の曲線と似た傾向を示しているようである。

(2) 流 速

図-6 は、海底より 0.85 m の位置において電磁誘導



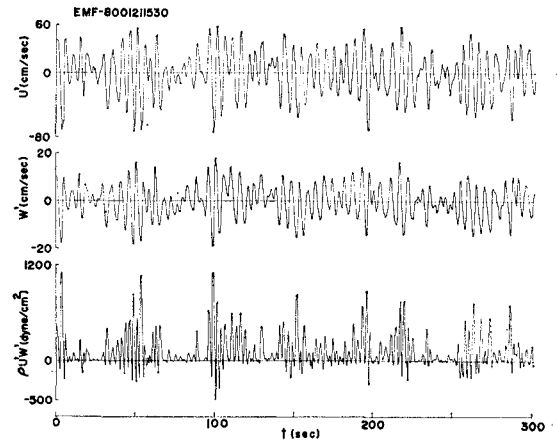
図—9 パワースペクトル, coherency および phase

に対して, 水平成分は $-8.2 \sim 32.3$ cm/sec の範囲にあり, 水平成分は鉛直成分の約 2.6 倍の大きさであることがわかる。

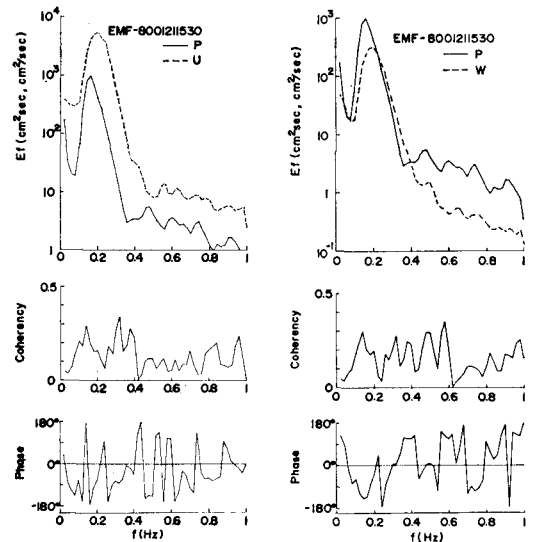
図—9 (a), (b) は, 水平成分と鉛直成分のパワースペクトル, coherency および phase を示したものである。(a) をみると, 水平および鉛直成分のパワースペクトルのピーク周波数は 0.2 Hz であり, 水平成分と鉛直成分の coherency はパワースペクトルのピーク周波数付近でかなり高く, 0.08~0.32 Hz の周波数帯では 0.8 以上の値を示す。phase は, 0.4 Hz 付近までは, 周波数が大きくなるにつれて増大し, 0.4 Hz より高周波側ではかなり変動していることがわかる。また, パワースペクトルのピーク周波数での phase は約 40° である。(b) をみると, 水平および鉛直成分のパワースペクトルのピーク周波数は 0.2 Hz で, coherency は 0.02~0.31 Hz の周波数帯で 0.8 以上の値を示し, 高周波側にずれるにつれてかなり大きく変動している。phase は, すべての周波数で負の値を示し, 0.34 Hz 付近まではほぼ 0 と見なし得, 0.54 Hz 付近で -90° といった値を持つことがわかる。微小振幅波理論によると波浪による水平および鉛直成分の位相差は 90° であるとされているが, 解析した資料についてはそうした結果は得られなかった。

図—10 は水平成分および鉛直成分の偏差とレイノルズ応力を示したものである。この図をみると水平成分および鉛直成分とも, ほぼ似た波形をしていることがわかる。また, レイノルズ応力はほぼ 30~50 sec 周期でピークが生じているようである。

図—11 (a), (b) は同時観測して得た流速の水平成



図—10 水平成分および鉛直成分の偏差とレイノルズ応力



(a) 圧力変動と水平成分との関係

(b) 圧力変動と鉛直成分との関係

図—11

分および鉛直成分と圧力変動の関係を示したものである。水平成分および鉛直成分のパワースペクトルのピーク周波数は 0.2 Hz, 圧力変動のそれは 0.16 Hz である。(a), (b) と, coherency の値は 0.35 Hz 以下であり, phase もかなり変動している。微小振幅波理論では, 水面変動と水平成分および鉛直成分の位相差はそれぞれ, 0° および 90° とされている。(a) をみると, 位相差が 0° と見なし得る周波数は 0.22 および 0.36 Hz 付近で, (b) をみると, 位相差が 90° と見なし得る周波数は 0.36~0.42 および 0.58 Hz 付近であることがわかる。

5. 結 語

以上, 著者らは前報に引き続き, 現地海岸において

有義波法によって求めた海底摩擦係数と相対粗度との関係を調べるとともに、波浪下における流れの観測を実施した。

その結果、海底摩擦係数と相対粗度との関係について、底質が砂である海岸および岩盤海岸において ripple の pitch を Nikuradse の相当粗度とした場合、観測結果は Jonsson, 梶浦および Kamphuis が半理論・半実験的に得た結果とかなりよく一致すること、波浪下における流れについては、各時間ごとの水平成分および鉛直成分の平均値はすべて負であり、それぞれ岸から沖および海面から海底へ向けての流れが強く、水平成分は鉛直成分の約 2.6 倍であること、水粒子の速度変化を一周期ごとに見ると、水平成分および鉛直成分の残留速度とも負であること、水平成分と鉛直成分の相関を調べた結果、両成分の位相差はピーク周波数付近では 90° ではないこと、などを見出した。

最後に、この研究を進めるにあたり、終始有益な御助言を頂いた京都大学岩垣雄一教授に深謝の意を表するとともに、快く資料を提供して下さいた建設省四国地方建設局松山工事事務所の方々、資料の整理や図面の作成に大いに助力を頂いた岡本和宣技官に謝意を表する。

なお、この研究は文部省科学研究費による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 柿沼忠男・伊福 誠: 中予海岸における波浪変形の観測—海底摩擦係数と粗度—, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 124~128, 1979.
- 2) Stokes, G. G.: On the theory of oscillating waves, Trans. Camb. Phil. Soc., 8, pp. 441~455, 1847.
- 3) Longuet-Higgins, M. S.: Mass transport in water waves, Phil. Trans. Royal Soc., London, Series A, No. 903, Vol. 245, pp. 535~581, 1953.
- 4) Russel, R. C. H. and J. D. C. Osorio: An experimental investigation of drift profiles in closed channel, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 171~183, 1958.
- 5) Huang, N. E.: Mass transport induced by wave motion, Jour. Marine Res., Vol. 28, No. 1, pp. 35~50, 1970.
- 6) Sleath, J. F. A.: A second approximation to mass transport by water waves, Jour. Marine Res., Vol. 30, No. 3, pp. 295~304, 1972.
- 7) Isaacson, M. de St. Q.: Mass transport in shallow water waves, Proc. ASCE, Vol. 104, No. WW2, pp. 215~225, 1978.
- 8) 平山秀夫: 波浪水槽中における進行波による単一粒子の残留速度に関する研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 23~27, 1978.
- 9) 平山秀夫: 斜面上の波動中における単一粒子の残留速度に関する研究, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5, 1979.
- 10) Kamphuis, J. W.: Determination of sand roughness for fixed beds, Jour. Hydraulic Res., Vol. 12, No. 2, pp. 193~203, 1974.
- 11) Jonsson, I. G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., pp. 127~148, 1967.
- 12) Kajiura, K.: A model of the bottom boundary layers in water waves, Bull. Earthq. Inst., Vol. 46, pp. 75~123, 1968.
- 13) Kamphuis, J. W.: Friction factor under oscillatory waves, Proc. ASCE, Vol. 101, No. WW2, pp. 135~144, 1975.
- 14) Bagnold, R. A.: Motion of waves in shallow water; Interaction between waves and sand bottoms, Proc. Roy. Soc. London, Series A, Vol. 187, pp. 1~18, 1946.
- 15) 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一: 波による浮遊砂に関する研究, 第 11 回海岸工学講演会論文集, pp. 159~168, 1964.
- 16) 樋口明生・柿沼忠男: 日吉津海岸における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報, 第 8 号, pp. 459~478, 1965.
- 17) 樋口明生・柿沼忠男: 二色の浜海岸における波浪観測について, 京都大学防災研究所年報, 第 9 号, pp. 685~701, 1966.
- 18) Jonsson, I. G.: A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layers, Inst. Hydrodyn. Hydraul. Eng. (ISVA), Tech. Univ. Denmark, Ser. Pap., 87 p.
- 19) Sleath, J. F. A.: Stability of laminar flow at seabed, Proc. ASCE, Vol. 100, No. WW2, pp. 105~122, 1974.