

沿岸漂砂量に関する現地観測

——岸沖方向分布および時間変動について——

Nicholas C. Kraus*. Raymond S. Farinato**. 堀川 清 司***

1. 緒 論

現地海岸で漂砂の移動量を測定するには、捕砂器を用いる方法¹⁾や、螢光砂調査による方法^{2),3)}が適用されている。螢光砂調査による方法は、沿岸漂砂量を全体的に把握しようとするもので、そこではいわゆる2層モデルを採用している。すなわち、波と流れの複合した作用によって、下層上の厚さの比較的薄い層の砂が、ある速さで移動すると考えるのである。この場合の移動層の厚さを、ここでは混合深さと呼ぶことにする。

砂層の移動速さや混合深さは、局所的な波と流れの底面に作用する応力に依存するが、その詳細は明らかでない。この2層モデルは、分から時間の比較的長い時間の現象で、しかもほぼ定常と考えてよい波や流れの条件に対して有効である。つまり実験時間は十分に長く、実験開始後ある時間を経過すると、混合深さは十分に発達して定常的な値となる。一方で、その実験時間には波や流れを定常と考えられる程度の短さが要求される。

螢光砂雲の重心の沿岸方向移動速さ V_a 、海底から採取したコアから求めた混合深さ b 、更に沿岸漂砂帯幅(通常は碎波帯幅)の積によって、沿岸漂砂量(容積)を求めるのが一般である。しかしながら、単位幅当りの漂砂量 $q = V_a b$ の分布が求められれば、これを碎波帯にわたって積分すれば沿岸漂砂量は適確に求めうる。

螢光砂調査は概念的には簡単であるが、いざ精度の高い定量的な調査を実施するとなると、① 螢光砂を投入してから周辺の土砂と混合し平衡状態に達するに要する時間、② 混合深さの定義の仕方、③ 碎波帯内での V_a や b の分布、などを明らかにしておく必要がある。

われわれの現地実験においては、下記のように非定常的な沿岸漂砂の移動現象が観測された。すなわち、第1回目には螢光砂投入測線に近い平行な2測線上で、螢光砂濃度が時間と共に著しく変動することを、第2回目には移動層内で螢光砂が次第に混合されて平衡状態に近づいていくことを、第3回目には同じ位置での混合深さ

が、螢光砂濃度の変化とほぼ同じ時間スケールで著しく変化していることを確認した。

2. 現地実験の方法

本論文では、1978年と1979年に茨城県阿字が浦海岸で行った現地実験の結果を報告する。当海岸の平均的な海底勾配は1/70、底質の中央粒径は0.20mmである。この海岸は、南北にのびる砂浜海岸の南端に位置し、その南は岩石性の海崖によって境され、実験地点では比較的流速の大きく定常的に北向きの沿岸流が発達している。この流れは波向き角には必ずしも関係しない。潮差は約1mで、高潮時に実験を行った。

図-1には1979年に行った時の実験の状況を、また図-2にはその時の海底地形を示す。実験の範囲をAからKまでの11測線、測線上に岸から1~9の測点を定め、格子点を設定した。図-2中の①~⑥の地点に、海底上10cmの高さに電磁流速計を設置した。沿岸方向の流速成分は観測中同一方向を示し、その平均値のまわりに約30cm/sの振幅で変動した(図-3)。これに対して岸沖方向の流速成分は、沿岸方向成分の1/4~1/2の大きさであった。よって、ここで観測された砂の移動は、ほぼ純然たる沿岸漂砂移動とみなしてよいと思われる。

海浜から採取した砂に、3色の螢光物質を塗布して色分けし、測線O上にそれぞれの螢光砂を約100Kg投入した。これは沿岸漂砂量の分布を調べ、かつ沿岸および岸沖漂砂の効果を識別するためである。実験時の碎波波高は約1m、有義波周期は約9sであった。

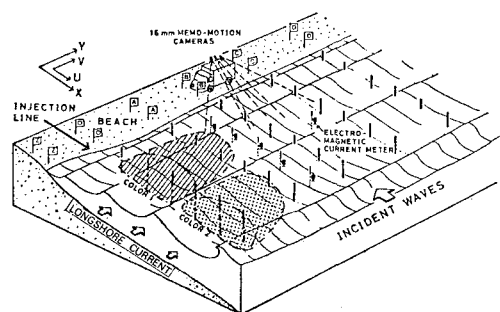


図-1 現地実験の状況図

* 正会員 Ph.D. 海岸環境工学センター

** Ph.D. 海岸環境工学センター

*** 正会員 工 博 東京大学教授 工学部土木工学科

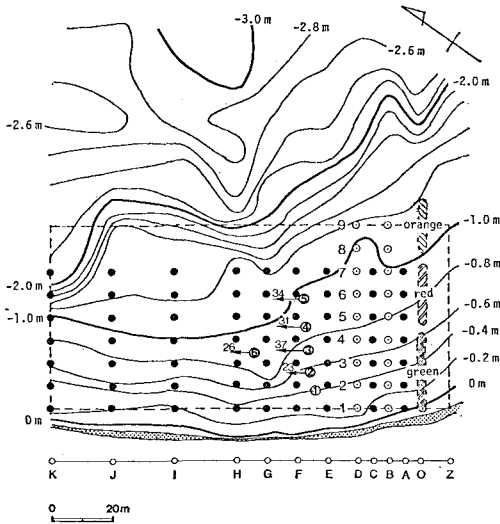


図-2 実験地点の地形と実験方法

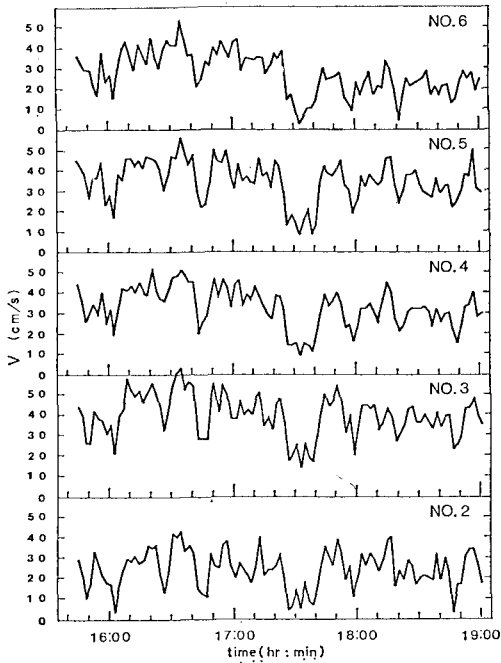


図-3 流速の沿岸方向成分の記録

混合深さの時間ならびに空間的な分布を求めるために、直径 5cm、長さ 28cm の PVC の円筒をコア・サンプラーとして用い、通常は約 14cm の長さのコアを採取した。採取は蛍光砂投入後 3 時間 15 分の間実施した。そのうち B および D 測線上の 18 地点では 15 分間隔に同時採取を行った。更に蛍光砂投入後 30 分および 120 分には、全格子点で採取を行った。なお 1978 年の実験では、蛍光砂は 2 種類、投入後 15、30、70、120 分に各格子点で同時採取を行った。

採取したサンプルは、採取時の攪乱の効果を除くため、

表層 1~2mm を取り去った後に、厚さ 2cm 毎に切って乾燥、秤量後、紫外線下で蛍光砂の粒子数を算えた。

3. 蛍光砂濃度の脈動現象

B および D 測線上でえられた、3 色毎の蛍光砂濃度の時間変化を図-4 に示す。蛍光砂の移動は驚く程に局所

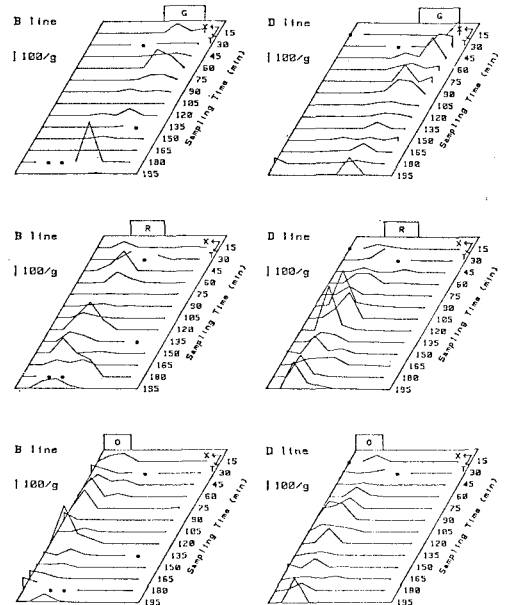


図-4 蛍光砂濃度の時間的変化

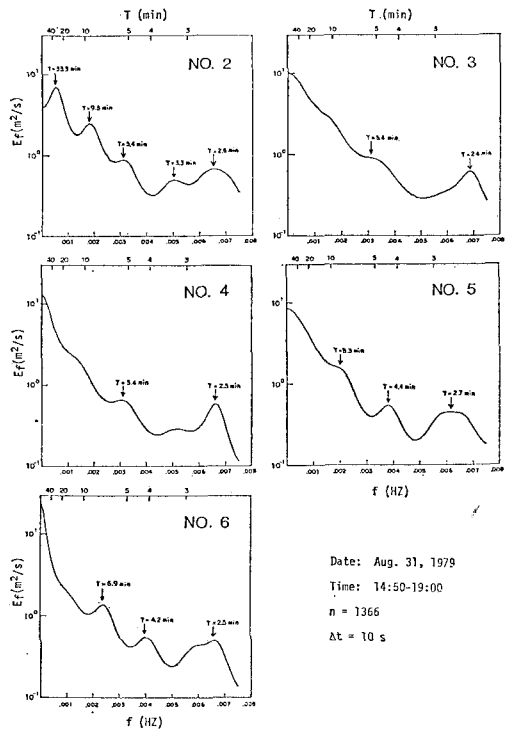


図-5 沿岸流速変動成分のスペクトル

的に集中し、その動きに脈動のあることがわかる。脈動の周期は45分から60分である。図-3に示したように沿岸流の流向は変化しなかったで、蛍光砂の脈動は、同一方向の移動に非定常的な現象があらわれたことを示唆している。これに対して、2層モデルの枠内で次のような説明が考えられる。その1つは、沿岸流や波の運動にこの脈動と同じ低周波成分の変動が存在したとするものである。もう1つは、外力には広範囲の周波数の変動が存在し、これが砂の動きに影響を及ぼし、沿岸漂砂量の小さい部分と大きい部分に分離したとするものである。

図-5に沿岸流速成分の変動スペクトルを示したが、数分ないし数十分の周期が卓越していることがわかる。しかしこれが原因で脈動が生じたかは疑問である。それよりも、流動する砂粒子の膨脹変形の不連続性が砂粒子の移動開始を支配し、この効果によって移動量の大小のパターンを形成したと考えた方が合理的であろう。移動層の膨脹変形は碎波帯にやってくる波群の平均波高と何らかの関係があると考えられる^{4), 5), 6)}。

4. 混合深さ

(1) 定義の仕方について

Komar²⁾は b をコア・サンプル中に蛍光砂が存在している最大深さ、あるいは蛍光砂濃度が急激に小さくなる深さにとり、14回の実験の結果、 b は2~10.5 cm、大部分は5~9 cmであると報告している。また Inman⁷⁾は特定のサンプラーを用いて1.5 cmの値をえたと報告している。Gaughan⁸⁾はサンプリング時の攪乱を最小にするように設計したサンプラーを用いて採取した約250個のコアを0.4 cmごとに切って解析を行った。彼はそのうちの60個のコアのデータを用いて、 b の値を3種類の定義によって求めて比較した。彼の実験においては、混合深さは約2 cmと小さかったが、蛍光砂粒子の見出される最大深さ $b_{\max}$ と、その他の方法で求めた b との差異は10%以下であったので $b_{\max}$ を用いることができると考えた。われわれの実験では、蛍光砂濃度分布からみて、蛍光砂粒子は上層6 cmに殆んど含まれているが、かなり多くの場合に更に深い層にも含まれていた。これから $b_{\max}$ を b の定義に用いるのは適当ではないと判断された。

直観的には最大濃度は表層に見られ、深さとともに濃度は単調に減少すると考えられる。このような分布は、1979 (1978) 年の資料では40 (52)%のコアについて確認された。その他の場合には何回かの混合が起こったために、その遺物が残って、深さ方向に濃度が増大する分布が認められた。そこで、不規則な波によって生じる効果を明らかにするために、混合深さ b をコア中に含まれる特定の色の蛍光砂の全数に対してある割合の粒子が含まれている深さをもって定義することにした。

統計的な信頼性を確保するために、約100 Kgの蛍光砂を投入した場合に、最小蛍光砂粒数を5/100gとし、それ以上のものを有為とした。また、格子点全体、沿岸方向、岸沖方向測線上のものをを用いて、混合深さの平均値を求めるにあたっては、特定の色の蛍光砂ごとに、サンプルの全濃度で重みづけをした。従って個々の混合深さの単純な平均値ではないことに注意されたい。

混合深さの計算において、cutoff (%)の効果を調べることにする。この際に、2 cmの厚さの部分には蛍光砂は一樣に分布しているものと仮定した。図-6はcutoff (%)と混合深さの関係を示したものであり、濃度重みつき平均混合深さが2 cmをこえた所まで直線性の保たれていることがわかる。このことは、底質中の蛍光砂はある深さまで一樣に存在していることを示唆している。そこで両者の関係が直線から偏る所のcutoff (%)に注目し、これに対応した深さをもって混合深さと定義する。

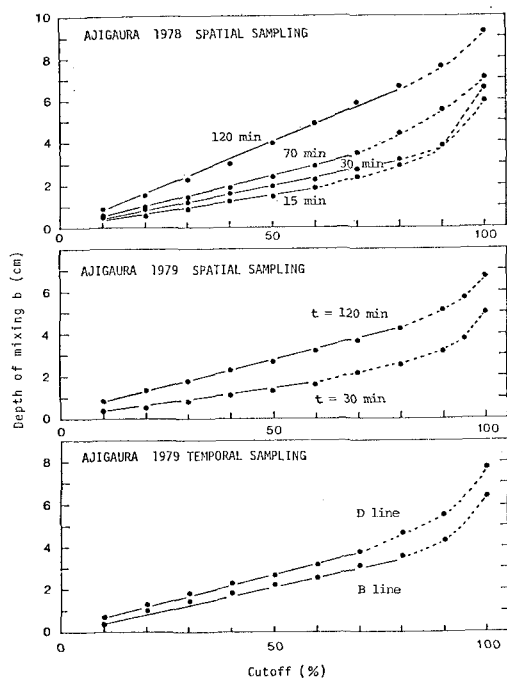


図-6 cutoffの違いによる混合深さの変化

空間的なサンプルを行った資料によれば、直線から偏る所の深さは一つの例を除けば、採取する時刻の増大と共に大きくなる。このことは蛍光砂が砂層中で混合し、次第に平衡していく状態を示している。図-6の何れの線も80から200本のコアの平均的な性質をあらわしている。個々のコアの濃度分布形はその勾配 dc/dz (ここで c は濃度、 z は海底面から下向きに測った深さ)によって分類した⁹⁾。なおこの値が5%以上のものについてのみ算出した結果、40~70%は $dc/dz < 0$ の単調減少型、30~40%は dc/dz の符号が1~2回変化する埋戻し型、残りの数%はその他の型であった。そこで2つ

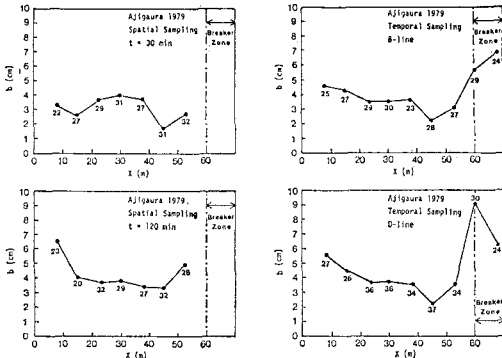
の卓越した型のものを平均すれば、一様に平均化され、図—6 に示した直線となることは直観的に理解される。

以上により、ある時間が経過して、螢光砂の混合が十分に進んで一様になった層の厚さは、約 80% の cutoff に対応し、それより深い部分の沿岸漂砂に寄与する割合は著しく小さいと考えられる。

(2) 碎波帯内での混合深さの分布

砂の移動、混合の度合は碎波帯内で必ずしも一様ではない。碎波点の付近では巻き碎波は海底面を洗掘し、それによって濃度の大きな浮遊砂を生じ、また比較的深い所まで混合を起す。同じようなことは、戻り流れが斜面をはい上るボア状の波と衝突する swash zone においても起る。従って混合深さは場所的に異なるであろう。

図—7 には 80% cutoff の平均混合深さの岸沖方向の分布を示した。各位置で使用したサンプル数を図中に記入した。これから碎波線と汀線の近くで b の値は極大となることがわかる。空間的なサンプリングの場合には、汀線は屈曲しているの、格子点でのサンプルで代表させるために、汀線近くでの値はかなり平滑化される傾向にある。ここで 30 分後と 120 分後の結果を比較すると、前者ではまだ平衡状態に達していないことがわかる。更



図—7 混合深さの分布

に同一の場所での混合深さの時間平均値を見ると、碎波帯内での混合深さには 2 つのモードがあり、汀線の近くと、碎波点付近で極大値をとる。碎波点付近での極大値はその他の場所での平均値の 2~3 倍になっている。以上のことから、swash zone や低潮時にコアを採取すると、混合深さの代表値としては過大な値を与えることになる。このようなことを防ぐためには、螢光砂投入測線に近い幾つかの測線で、碎波帯幅全体について何回もコアを採取し、それを時間的に平均して混合深さを求めるのが最善である (図—8 参照)。

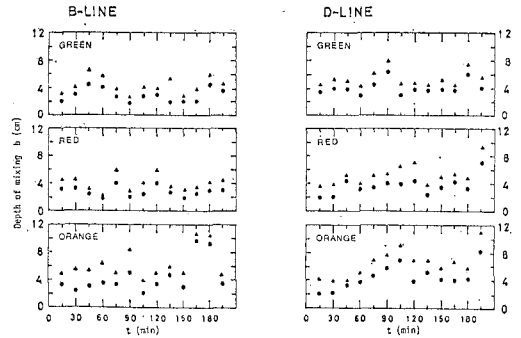
5. 螢光砂実験の平衡に達するに要する時間

螢光砂が平衡に達するには、ある程度の時間を必要とする。従って定量的に 2 層モデルを適用するには、この

平衡の状態に達してから測定される必要がある。

(1) 混合深さの時間的变化

図—8 には 1979 年の実験によってえられた、B および D 測線上、色ごとの混合深さ b の時間変化が示されて



図—8 混合深さの時間的变化

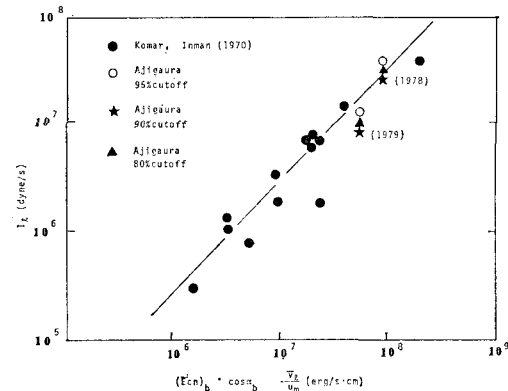
いる。これによると、 b は平均値のまわりに、大略 30 分から 1 時間の周期でやや不規則に変動していること、また螢光砂投入後 15~30 分過ぎると平均値に近い値のえられることがわかる。ただし橙色の螢光砂は例外で、これは大部分の螢光砂が碎波帯内格子点の外に出てしまったので、定性的な結果を示すのみであると解釈しなければならない。このように急速に平衡に近づいたのは、螢光砂投入測線から B と D 測線への距離が 10m および 20m とごく近かったためと考えられる。図—6 に示した b の空間的な格子点平均値には螢光砂投入線からかなり離れた所でのものが含まれている。1979 年の空間的なサンプリング実験においては、汀線付近と碎波線の近くでの b の値は、30 分後に対して 120 分後には殆んど 2 倍になっている。また 120 分後の値は B および D 測線での時間的なサンプリングの値とほぼ等しくなっている。よって、混合深さは平均値の周りに変動するが、螢光砂投入線に近い程急速に定常的な平均値に近づくと結論づけられる。 b の格子点全体にわたっての平均値には、投入線からの距離の累積効果が含まれるので、その値が平衡状態のものであるか否かを確認しておく必要がある。本実験の結果、投入線より 10~20m 下手では 15~30 分で、また 120m 下手では約 2 時間後に平衡に達した。

(2) 移動速さ

砂粒子の沿岸方向の移動速さ V_a は、螢光砂雲の重心が時間 t の間に移動した距離 y_m から $V_a = y_m/t$ によって求められる。更に混合深さ b を用いて、単位幅当りの沿岸漂砂量 $q = V_a b$ を求める。このようにしてえられた 1979 年の結果を表—1 に示した。1978 年の実験では赤と緑色の螢光砂を碎波帯内の岸寄りおよび沖寄りに投入したが、両者の q の値は基本的にはほぼ等しい。また V_a は 1~2 時間で平衡に達したとみてよい。つぎに 1979 年の実験では緑、赤、橙色の螢光砂を碎波帯の岸側

からそれぞれ 1/3 の領域に投入した。移動速さ V_a は 1978 年のときと同様に 2 時間後には平衡に達したとみてよい。これによって空間的にも有益な情報がえられ、多数の色の螢光砂を同時に使用することの有効さが確認された。混合深さと同様に、移動速さにも 2 つのモードが存在し、従って沿岸漂砂量 q も岸沖方向に分布をもつことが知られる。一方で、一様勾配海浜では沿岸流速が汀線と碎波線の間で最大値をとることが知られているが、現実の step 型の海浜ではむしろ流速分布が平坦化される傾向にある¹⁰⁾。このような沿岸流速の分布と沿岸漂砂量の分布との間の関係は今後の検討課題である。

以上によってえられた q の値から沿岸漂砂量を評価し、Komar-Inman⁹⁾ の提示した関係図上に図示したのが 図—9 である。3 種類の cutoff の結果が示されているが、2 回の結果とも、かなり良く直線上に乗っている。



図—9 沿岸漂砂量評価値と Komar-Inman の結果との対比 (記号については原論文⁹⁾を参照のこと)

6. 結 論

螢光砂調査によって、碎波帯内での混合深さ、移動速さの分布を求め、これから沿岸漂砂量の評価を行った。本実験を通して、螢光砂調査を行って定量的な評価を行うためには、① 混合深さの定義を明確にする必要のあること、② 混合深さや砂移動速さが平衡に達するには、螢光砂投入後ある時間を要すること、③ 碎波帯内で混合深さや砂移動速さは分布をなすので、複数の色の螢光砂を用いて調査をする必要のあることを明らかにした。これらの事実を念頭において、適合した観測計画をたてて螢光砂調査を実施する必要がある。

本実験を行うにあたっては、多くの人々の献身的な協

表—1 沿岸漂砂量算定結果 (1979 年)

Cutoff (percent)	Tracer color	Sampling time (min)	y_m (m)	V_a (mm/s)	b (cm)	q ($10^3 \text{ m}^3/\text{yr/m}$)
80	Green	30	26.7	14.8	4.5	21.2
	Red	30	9.3	5.2	3.8	6.2
	Orange	30	29.4	16.4	3.8	19.6
	Green	120	34.8	4.8	4.5	6.9
	Red	120	14.3	2.0	3.8	2.4
	Orange	120	29.7	4.1	3.8	4.9
90	Green	30	26.7	14.8	5.3	24.9
	Red	30	9.3	5.2	4.6	7.5
	Orange	30	29.4	16.4	4.6	23.9
	Green	120	34.8	4.8	5.3	8.1
	Red	120	14.3	2.0	4.6	2.9
	Orange	120	29.7	4.1	4.6	6.0
95	Green	30	26.7	14.8	6.1	28.5
	Red	30	9.3	5.2	5.3	8.6
	Orange	30	29.4	16.4	5.3	27.2
	Green	120	34.8	4.8	6.1	9.3
	Red	120	14.3	2.0	5.3	3.3
	Orange	120	29.7	4.1	5.3	6.9

力をえた。特に海岸環境工学センターの佐々木民雄、久保田進、針貝聡一氏の努力に負うところが大きかった。また電磁流速計によるデータの取得、その処理については東京大学助手 磯部雅彦氏の労をわずらわした。ここにこれらの方々に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Sawaragi, T. and I. Deguchi: Distribution of sand transport rate across a surf zone, Proc. 16th Conf. Coastal Eng., pp. 1596~1613, 1978.
- 2) Komar, P. D.: The longshore transport of sand on beaches, Ph.D. Thesis, Univ. of Calif., San Diego, 143 p., 1969.
- 3) Komar, P. D. and D. L. Inman: Longshore transport on beaches, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 5914~5927, 1970.
- 4) Bagnold, R. A.: Mechanics of marine sedimentation, in The Sea, Vol. 3, pp. 507~528, edited by M. N. Hill, Interscience, New York, 1963.
- 5) Bagnold, R. A.: An approach to the sediment transport problem from general physics, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 422-1, 37 p., 1966.
- 6) Bailard, J. A. and D. L. Inman: A reexamination of Bagnold's granular-fluid model and bed load transport equation, Jour. Geophys. Res., Vol. 84, pp. 7827~7833, 1979.
- 7) Inman, D. L.: Presentation at the Nearshore Sediment Transport Study Workshop at La Jolla, 1979.
- 8) Gaughan, M. K.: Depth of disturbance of sand in surf zone, Proc. 16th Conf. Coastal Eng., pp. 1513~1530, 1978.
- 9) Crickmore, M. J.: Measurement of sand transport in rivers with special reference to tracer methods, Sedimentology, Vol. 8, pp. 175~228, 1967.
- 10) Kraus, N. C. and T. O. Sasaki: Influence of wave angle and lateral mixing on the longshore current, Marine Sci. Comm., Vol. 5, pp. 91~126, 1979.