

カラーサンドの追跡による粒径毎の 漂砂量特性調査

FIELD OBSERVATION OF SAND TRANSPORT RATE WITH DIFFERENT GRAIN SIZES USING COLORED SAND

小林昭男¹・宇多高明²・遠藤将利³・野志保仁⁴・酒井和也⁵・清水達也⁶

Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Masatoshi ENDO,
Yasuhito NOSHI, Kazuya SAKAI and Tatsuya SHIMIZU

¹正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

²正会員 工博 (財) 土木研究センター理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部
海洋建築工学科 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4 タカラビル)

³学生会員 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

⁴正会員 博(工) (有) アイコムネット (〒100-0014 東京都千代田区永田町2-10-2 永田町TBRビル)

⁵正会員 修(工) (有) アイコムネット (同上)

⁶学生会員 修(工) 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

Field observation of sand transport rate of each grain size using colored sand was carried out at the Taito coast. Sand with the median diameter of 0.3 mm and 0.5 mm was used for colored sand. Samples of seabed material were taken using core pipes at 1, 2 and 24 hours after injection. The movement and velocity of colored sand with the median diameter of 0.3 mm and 0.5 mm was almost the same, but the amount of transport was different (large amount: fine sand vs. small amount: coarse sand).

Key Words : Sand drift, colored sand, field experiment, grain size, Taito coast

1. はじめに

近年、海浜変形予測に関する研究の進展に伴い、予測モデルの性能と予測精度が急速に向上している。しかし、これらのモデルで使われている漂砂量係数は、粒径によらず、経験的に得られたある一定値を与えるのが主であり、粒径と漂砂量係数の関係を細かく検討した例はあまりない。各地での海岸調査の経験によれば、粒径毎に漂砂量係数が異なるのではないかと考えられるが、それを実証するデータはあまり存在しない。したがって、この種の問題に関しては、まず現地海岸でのデータが必要と考え、本研究では、九十九里浜南端に位置する太東海水浴場において、粒径毎に色分けしたカラーサンドを投入し、その移動状況の追跡を行い、粒径毎の漂砂特性について考察することとした。観測を行った太東海水浴場は、図-1に示すように南側を太東漁港の防砂突堤により区切られたフック状の海岸線を有している。このため、沖波が汀線に直接作用するのではなく、回折波が作用する条件にある。このため防波堤の北

側数十m区間は、年間を通じて安定な汀線が伸びている。汀線は安定であるが、防砂突堤による波の遮蔽効果により防砂突堤の外側から内側の波の遮蔽域へと沿岸流が発達し、常時反時計回りの循環流が生じている場所である。当海岸を構成する砂の代表粒径は $d_{50}=0.2$ mm程度である。カラーサンド実験では、現地海岸とほぼ同じ粒径の $d_{50}=0.3$ mmの砂と、それよりも大きい $d_{50}=0.5$ mmの砂を用意した。また放物

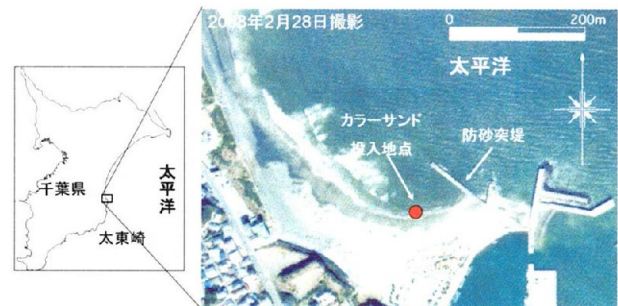


図-1 実験地の位置

型モデル¹⁾により波浪場を算出するとともに、海浜流の流速分布を算出し、カラーサンドの分布状況と海浜流速の関係について考察する。

2. カラーサンド実験の方法

実験は2008年12月9日～11日に実施した。実験対象海域は、冬季には主に北東方向からの波が来襲するが、図-1に示すように太東漁港の西端には海岸線とほぼ平行に防砂突堤が伸ばされているため、これによる波の遮蔽効果が発揮され汀線が大きく湾曲している。また現地の前浜勾配は平均で約1/15であるが、汀線以深の海底勾配は約1/90と遠浅の海岸である。現地実験では、まず深浅測量を行った後、粒径毎の漂砂特性を調べるために、防砂突堤の先端を通る岸沖測線と汀線との交差する付近に $d_{50}=0.3\text{ mm}$ と 0.5 mm の購入砂で作ったカラーサンドをそれぞれ100 kg投入した。図-2には実験区域の海浜地形を示すが、カラーサンド投入地点の水深は約0.4 mである。サンプリング地点の平面位置は同じく図-2に示すが、防砂突堤による波の遮蔽域の外から内側へと沿岸方向に約2m間隔で20測線を配置し、各測線上において岸沖方向にも2 m間隔で、それぞれ測点を3点ずつ配置した。したがって全サンプリング地点数は60となる。サンプリング地点の水深は0.25 m～0.75 mであり、汀線とやや斜行し、測線No. 20側がやや水深が増大する場所である。

カラーサンドのサンプリングは投入後1, 2h後と24h後の3回行った。カラーサンドは時間的に広がることから、1, 2h後の測定では測線No. 10まで観測点を配置し、24h後では20測線全体でサンプリングを行った。カラーサンドの採取には、図-3に示す直径7.1 cmのコアパイプを用い、海底面から約5 cm厚の砂を採取した。採取した砂は乾燥後、粒度分析を行うとともに、それぞれの地点におけるコア中に含まれるカラーサンドの個数を計測した。これとは別に、カラーサンド1 g中のカラーサンド個数を求めておき、これらの関係からカラーサンドの個数をコア中のカラーサンド重量に変換した。また観測時の波浪について、本調査は1h, 2h, 24h後という短期的なものであることと、また調査当日は常に安定した波が作用していたことから、10波程度の簡易測定でも波浪特性の把握が可能と考え、観測者が長さ2 mのポールを砕波点に立て、それから砕波波高を直読した。また周期は10波に要する時間を測定して算出した。

3. 観測結果

実験時における砕波波高は約0.4 m、周期は10 s

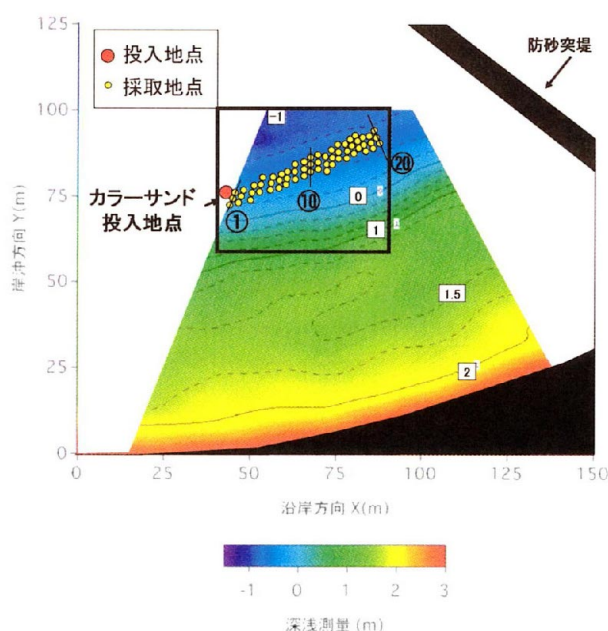


図-2 海浜形状と採取地点の配置



図-3 コアパイプによる砂の採取状況

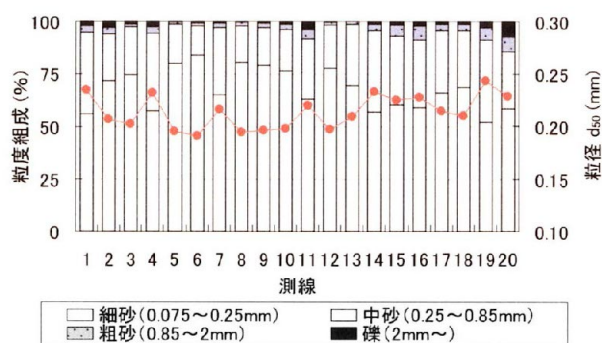


図-4 沿岸方向の粒度組成図

であった。次に、上記60点での底質採取データを篩い分け分析し、各測線上最も岸側に位置する汀線付近における粒度組成の沿岸分布を求めた結果を図-4に示す。沿岸方向に見ると細砂が平均約68%、中砂が約27%であり、両方で95%以上を占める。細かく見るとNo. 20近傍では礫の組成が高まっている。 d_{50} は0.19 mmから0.24 mmまで分布しているが、測

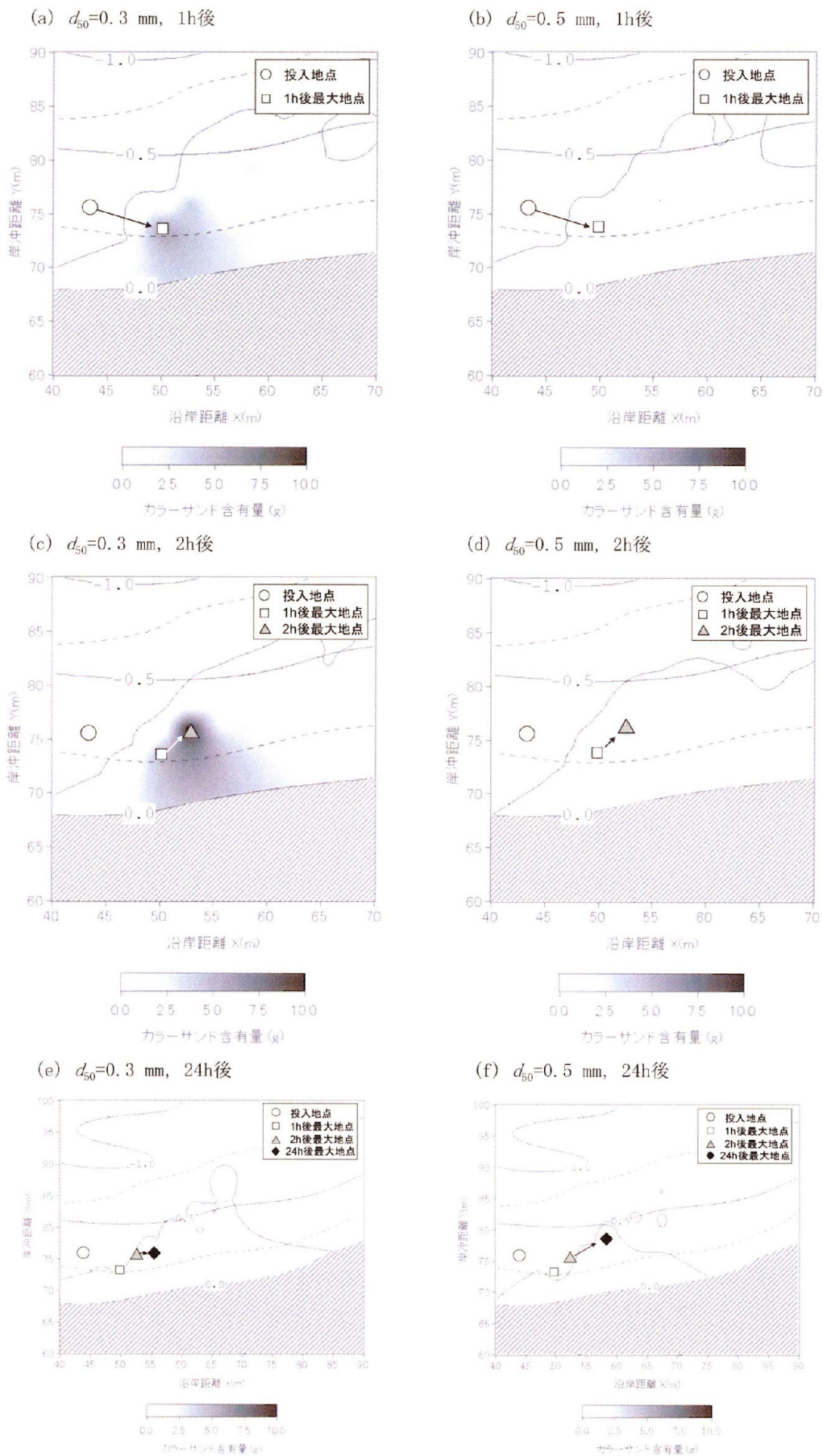


図-5 カラーサンドの広がり状況

線No. 6からNo. 9付近で小さく、No. 20に向かいやや増加する傾向がある。採取したサンプルから得られたカラーサンドの時間毎の分布状況と、カラーサンドの最大含有量が見られた地点（以下、最大地点と略す）、および拡散範囲を図-5に示す。図中のカラーサンド含有量は、コアパイプの面積40 cm²より、100 cm²あたりの含有重量に置き換えたものである。また、カラーサンドの拡散域の外縁を結ぶ線を滑らかな曲線で示す。

$d_{50}=0.3$ mmのカラーサンドは、1、2h後には岸側に広がったが、発見個数が最も多い場所は汀線付近にある。24h後には拡散が著しく、わずかなカラーサンドが見出されたのみである。これに対して、 $d_{50}=0.5$ mmの1、2h後のカラーサンドの拡散範囲もほぼ同様であるが、密度が低い。また、24h後では $d_{50}=0.3$ mmのカラーサンド同様に採取量はわずかであった。

カラーサンドの最大含有量が見られた地点は、 $d_{50}=0.3$ mmと0.5 mmのカラーサンドでそれぞれ1h後には6.8 m移動した。砂の移動は汀線に対して斜め岸向きであったことから、汀線方向成分とそれと直角方向成分に分けて移動距離を求めると表-1となる。次に、1h後から2h後までの移動距離は3.5 mと3.6 mであり、初期から1h後と比べ、移動距離が約3 m短くなった。これは砂の投入位置が碎波帯であったため、投入後は直ちに岸側へ流されたが、やがて寄せ波と引き波の作用下でほぼバランスしたためと考えられる。一方、 $d_{50}=0.3$ mmと $d_{50}=0.5$ mmのカラーサンドの最大含有量が見られた地点は、ほとんど重なっていたにもかかわらず、24h後の結果のみ $d_{50}=0.5$ mmの砂が大きく移動している。通常、粒径の小さい砂のほうが移動しやすいことを考えると、明らかに矛盾している。この理由として、24h後のカラーサンドの含有量は全体に極端に少ないことから、カラーサンドの最大含有量が見られた地点の推定精度が低下し、これに伴う誤差が多く含まれたためと考えられる。

観察によれば、カラーサンドは浮遊して移動するのではなく、掃流砂として動いた。また、砂の動きとしては、汀線と平行に単調な形で移動するのではなく、寄せ波と引き波の作用を受けつつ、沿岸方向に移動する状況が観察された。さらに、カラーサンド投入時に、投入地点にカラーサンドが埋まるという現象も観察された。この理由として、カラーサンドを投入すると、その上に周囲の砂がのってしまい、結果としてカラーサンドの移動が阻害されたことが考えられる。

図-5の2h後の分布域全体でのカラーサンドの重量を粒径別に積分すると、 $d_{50}=0.3$ mmのカラーサンドが約60 kg、0.5 mmのカラーサンドが約20 kgであった。すなわち、 $d_{50}=0.3$ mmのカラーサンドは全投入量の約60%が、 $d_{50}=0.5$ mmのカラーサンドは約

表-1 カラーサンドの時間ごとの移動距離

d_{50} (mm)	移動時間	移動距離 (m)		
		移動距離	沿岸方向	岸沖方向
0.3	初期～1h	6.8	5.7	3.4
	1h～2h	3.5	3.2	1.5
	2h～24h	2.9	3.0	0.2
0.5	初期～1h	6.8	5.7	3.4
	1h～2h	3.6	3.2	1.7
	2h～24h	6.7	6.3	2.4

20%が移動したことになる。 $d_{50}=0.5$ mmのカラーサンドに比べ、 $d_{50}=0.3$ mmのカラーサンドは約3倍の重量が運ばれている。この場合、粒径が細かいものは周囲の砂とほぼ同じ粒径であることから移動しやすいため大量に移動し、カラーサンドの埋まる量が少なかったと考えられる。これに対して粒径が粗いものは細かいものに比べて動きにくく、結果として細かいものよりも多くの量が埋まり、移動可能なカラーサンドの量が減ったと考えられる。これより、残りの40%、80%は投入地点に留まったと考えられる。

最大地点の移動速度について、粒径別に時間変化をみると粒径による差はあまり見られない。このように、粒径毎に比較すると、移動速度はあまり変化しないが、移動量が粒径別に違うことが現地実験より明らかとなった。また、 $d_{50}=0.5$ mm、0.3 mmのカラーサンドはともに1h後の結果よりも2h後の結果の方が全体に量が多い。これは、潮位条件が変化したことにより投入した時点で埋まっていたカラーサンドが移動したためと考えられる。

4. 波高と海浜流の計算

地形測量結果をもとに、海浜流計算を行うために実測汀線形状に沿うように補間して求めた地形図を図-7に示す。この海底地形を与えて放物線型モデルにより波高分布を求め、それより海浜流計算を行った。表-2に示す沖波の波高・周期は測定地点の碎波波高に合うように設定し、波向は観測（12月9～11日）と同じ冬季の2月28日撮影の空撮（図-1）と等しいと仮定して読み取った。

図-8には波高分布、図-9には海浜流流速を示す。波高分布を見ると防砂突堤による回折が著しく、遮蔽域内では波高が大きく低下している。また流速をみると、遮蔽域内では右向きの沿岸流が生じており、流れの向きとカラーサンドの移動方向は同一なことが分かる。また、突堤の内側ほど流速が減少している。これらの計算をもとに、カラーサンドの投入点と各時間のカラーサンドの最大発見地点の流速を表-3に示す。すでに図-5で明らかにしたように、カラーサンド投入から1h後、1hから2h後、2hから24h後と、時間経過とともにカラーサンドの移動距離が大きく減少したが、この理由は表-3のように

表-2 計算条件

数値計算手法	波浪変形計算モデル:放物型波動方程式モデル,磯部(1986) ¹⁾ 海浜流計算モデル:平面2次元の運動方程式と連続式,堀川(1985) ²⁾
対象計算範囲	波浪変形計算:沿岸方向150m×岸沖方向150m 海浜流計算:沿岸方向150m×岸沖方向150m
波浪条件	沖波波高 $H_0=2\text{m}$, 沖波周期 $T_0=10\text{sec}$, 波向 $N40^\circ E$
地形条件	地形測量結果
波浪変形計算条件	数値計算法:差分法(クランク・ニコルソン法) 計算メッシュ:0.03波長 不規則波の成分波への分割数:周波数5分割×波向9分割=計45成分波($S_{MAX}=25$) 境界条件:開条件
海浜流計算条件	数値計算法:差分法(リーブフロッグ法) 計算メッシュ: $\Delta x=1\text{m}$ タイムステップ: $\Delta t=0.01$ トータルタイムステップ:4000 摩擦係数: $C_f=0.01$ 水平拡散係数: $N=0.01$ 境界条件:海域は開条件、陸域との境界は固定壁境界

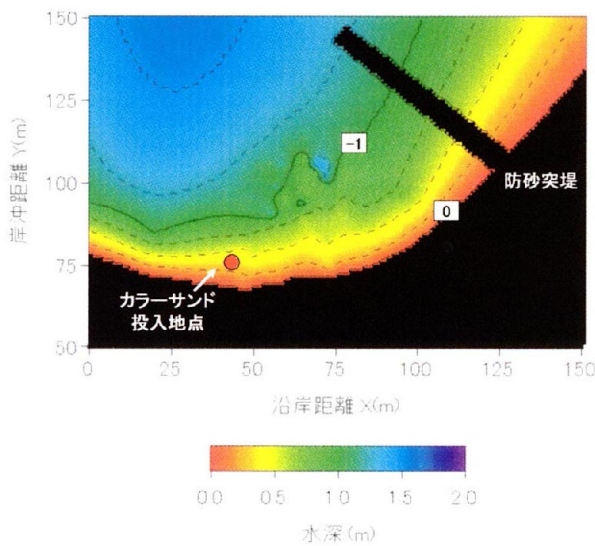


図-7 計算に用いた海底地形

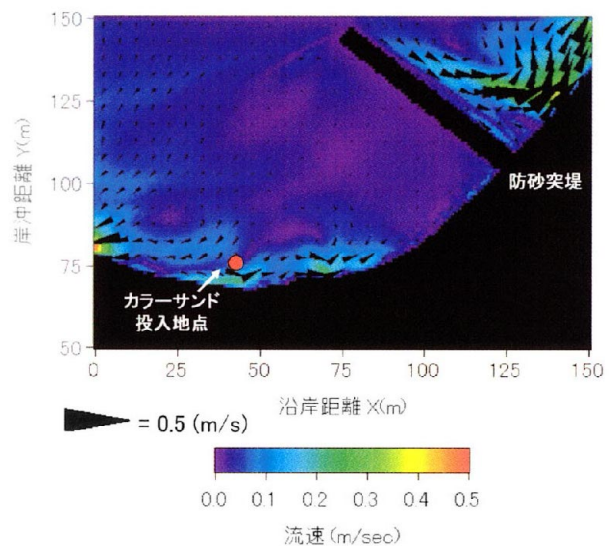


図-9 海浜流の流速

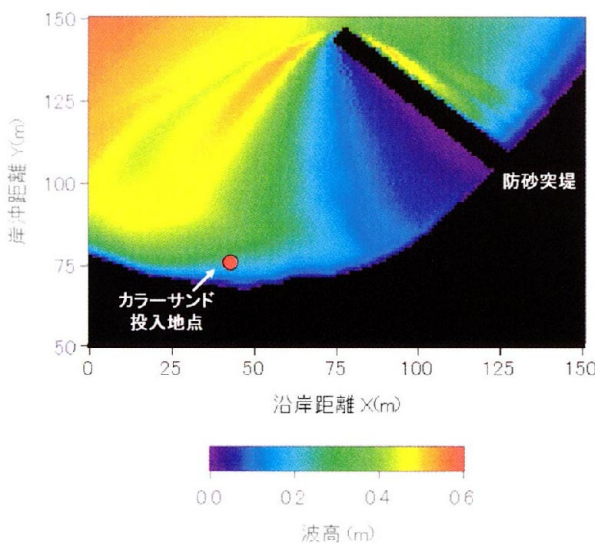


図-8 波高分布

表-3 カラーサンド投入地点および最大含有量が見られた地点の流速

		流速 (m/s)
0.3 mm	カラーサンド投入地点	0.14
	1h後 最大地点	0.10
	2h後 最大地点	0.10
0.5 mm	24h後 最大地点	0.08
	1h後 最大地点	0.10
	2h後 最大地点	0.10
	24h後 最大地点	0.01

防砂突堤による波の遮蔽域の内側ほど流速が低下していることに対応すると考えられる。さらに、砂の移動速度と流速との関係について、表-3に示したカラーサンド投入地点の流速0.14 m/sに対し、表-1に示す投入後1時間の砂の移動速度0.0019 m/sは約1.3%の大きさになることが分かった。

5. まとめ

太東海水浴場でのカラーサンドを用いた現地実験によると、 $d_{50}=0.3\text{ mm}$ と 0.5 mm の砂では移動距離と移動速度には大きな変化は見られなかったが、移動量には顕著な違いが現れた。養浜時において今回の実験のように養浜砂がその付近の海底砂に埋まってしまえば岸側へ供給されないことも十分起こりえることである。

今回の実験では、波高 0.4 m に対して $d_{50}=0.5\text{ mm}$ の砂が大量に埋まり移動量が減るという現象が見られた。波浪の低い場所に限らず、外洋に面した高波浪の作用する場所に礫などの粒径の粗い砂を沖合養浜^{3) 4)}した際にも同様の現象が起こる可能性があると考えられる。この場合、岸に供給されることを予想して沖合養浜を行ったにもかかわらず、沖合養浜した砂が埋まってしまい、当初想定していた岸側への土砂供給が期待できないという現象が起こる。今後の養浜にあってはこのような点について十分な注意が必要と考えられる。

謝辞：本研究の実施に際し、多くの日本大学理工学部学生の手を借りた。この場を借りて彼らに感謝の意を表する。また、本研究は平成 20 年度日本大学理工学部特別推進研究費（研究代表者小林昭男）の補助を得て実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 磯部雅彦：放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法，第 33 回海岸工学講演会論文集，pp. 134-138，1986.
- 2) 堀川清司編：海岸環境工学-海岸過程の理論・観測・予測法，東京大学出版，p. 582，1985.
- 3) 宇多高明・青島元次・山野 巧・吉岡 敦・三波敏郎・石川仁憲：神奈川県茅ヶ崎中海岸の事例にみる養浜の考え方，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 1057-1034，2007.
- 4) 宇多高明・清野聡子・大矢忠一・安田武夫・高橋巧・古池 鋼・星上幸良：沖合投入土砂の養浜効果予測手法の開発，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 641-645，2005.