

海浜礫の変異系列に関する現地実験

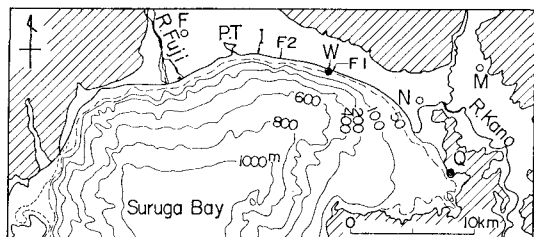
服 部 昌太郎*・鈴 木 隆 介**

1. ま え が き

海浜変形の予測や沿岸漂砂卓越方向の推定などの基礎資料として、海浜堆積物の変異系列（たとえば海浜礫の粒径の汀線方向の変化）が各地で調査されてきた^{1),2)}。しかし、変異系列の意味、たとえば粒径変化の原因（選択運搬と摩耗効果の識別、礫の物性・岩質の影響、変異勾配・移動速度・流体力間の関係といった変異機構）についてはほとんど解明されていない。この問題に関連して Carr³⁾ は他海岸から搬入した小円礫の投入による漂砂実験を行なったが、これは漂砂の卓越方向と速さの確認には有効であるが、粒径や摩耗の効果の確認に関しては難点が残っている。

そこで、本研究では、静岡県富士海岸の海浜に、既存海浜礫と容易に識別しうる岩質の岩塊とビー玉を投入し、それらを追跡して海象条件との関係を求め、上記の諸問題を解明するための基礎資料を得ようとした。

富士海岸は由比から富士川河口、田子の浦港をへて沼津に至る全長約 27 km、海浜幅 150 m 内外の砂礫海岸である（図—1）。田子の浦港から沼津港までの間には、2つの放水路のほかには構造物がなく、またそれらによる汀線変化も比較的小さく、全般に平滑な海浜である。ま



図—1 富士海岸の概要と試験礫の投入地点

I：試験礫の投入地点，W：原観測所（波浪測定），Q：試験礫の採石場，P.T.：田子ノ浦港，F：富士市，N：沼津市，M：三島市，F1：第1放水路，F2：第2放水路（昭和放水路），斜線部：山地・丘陵地

た、海浜背後には海岸堤防が築かれ、そこに建設省 B.M. が約 250m の間隔で設置されており、位置の確認に役立った。

2. 実験方法

(1) 試験礫の性状

試験礫は沼津市静浦大久保ノ鼻の採石場で採取した角閃石複輝石石英安山岩（第三系内浦火山角礫岩層に属する貫入岩体⁴⁾）である。採石場では、一辺 10～30 cm の六角柱状節理が顕著に発達し、岩相はほぼ一様である。この岩石は乾燥時には黄白色、湿潤時には明褐色になる。斑晶として石英、斜長石、角閃石が肉眼的に認められ、石基はガラス質で軟質であり、球状の軽石塊（径 1 cm 内外）が点在する。この岩石は表—1 のような物理的・力学的性質をもち、土質工学会統一岩盤分類案主分類法の CH₂ に属するが、比較的に軟質である。富士海岸の既存海浜礫は主として砂岩、粘板岩、花崗岩類、玄武岩、チャートなどであり、上記の特徴をもつ石英安山

表—1 試験礫の物理的・力学的性質

試 験 項 目	含水状態	試料個数	平均値	標準偏差
乾燥単位体積重量 (gr/cm ³)	乾	10	2.34	0.02
最大含水比 (%)	湿	10	4.44	0.21
縦波速度 (km/sec)	乾	5	3.2	0.06
	湿	5	3.3	0.07
横波速度 (km/sec)	乾	5	2.5	0.11
	湿	5	2.5	0.21
動弾性係数 (×10 ⁸ kg/cm ²)	乾	5	3.5	0.57
	湿	5	3.1	0.73
圧縮強さ (kg/cm ²)	乾	5	615	41
	湿	5	341	44
圧裂引張強さ (kg/cm ²)	乾	5	70	4.5
	湿	7	29	3.8
ロスアンゼルス試験（浸水法）すりへり減量 (500 r, loss %)	湿	1	18.3	—

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部

** 理博 中央大学教授 理工学部

岩礫は存在しないので、試験礫の肉眼的発見は容易であった。

投入時の試験礫は、採石場で崩されたままの六角柱状節理面で分離した長柱～短柱状の岩塊であり、総個数は約 7 000 個、その中から無作為に選んだ 140 個の見掛け体積（長径×中径×短径）の平均は $8.3 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 、最大 5 個の平均は $2.4 \times 10^4 \text{ cm}^3$ であった。

(2) 投入方法

試験礫の投入は 1975 年 8 月 5 日 13 時 30 分から 16 時までの漲潮時に行なった。この時の最終碎波波高は約 1.5m であった。投入地点は、田子ノ浦港の東方、建設省 B.M. No. 55 の西方 100 m の海浜である（図-1 および 2）。この付近では一般に、前浜には長径約 8 cm 以下の礫がカスプを形成しており、後浜には海岸堤防までの間に大礫（ $6 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ）の集積帯、ゴミの集積帯、粗砂～中砂帯、植生帯が順に配列している（図-2）。

この海浜の汀線から後浜にかけて、試験礫を突堤状に長さ約 42m、幅約 3m、高さ約 0.3m（試験礫平均短径の約 1.5 倍）にブルドーザを用いて敷設した（図-2）。

ビー玉（直径 1.6 cm）は、1975 年 8 月 15 日に青色のものを、9 月 9 日に猫目のもの、それぞれ 2 万個を試験礫投入地点の汀線上に塊状においた（図-2 の A、B）。

(3) 追跡方法

追跡調査日（表-2）には、汀線から海岸堤防までの間に 4～5 名の調査員を配置し、海浜表面に散在する試験礫を踏査発見した。発見礫は下記諸項目の計測後、発見位置に戻した。

a) 発見位置：汀線方向の位置は建設省 B.M. を利用して投入地点からの距離を求め、汀線と直交方向の位置は海岸堤防からの距離を測り、また海浜縦断面上におけ

る前後浜およびゴミ集積帯などに対する相対位置も記録した。

b) 粒径：発見礫の長・中・短径を測定し、これより見掛け体積と形状係数を算出した。

c) 円磨度：カラスライドに長径と中径を含む面および長径と短径を含む面を撮影し、それを Krumbein の円磨度表と 5 人で個別に比較し、その平均値を求めた。

ビー玉については、汀線方向の 5m 区間ごとに発見された個数を記録した。

3. 追跡結果

(1) 概要

追跡期間中の 8 月 16～17 日および 8 月 20～23 日に台風 5 号および 6 号に伴う高波が富士海岸に来襲した。8 月 15 日までは“敷設堤”の後浜側約半分は著しい変形を受けずに原位置に残存していたが、台風 5 号のさいに全試験礫が移動し、その後の試験礫発見個数は 130 個内外となった。追跡結果の概要を表-2 に示す。

発見礫の分布をみると、台風 5 号以前には（図-2）、“敷設堤”の先端部から順次、礫が波によって後浜に打ち上げられ、敷設堤からの汀線方向の距離が大きくなるほど“分布帯”の幅が小さくなり、かつ分布密度が減少し、前浜より後浜に多く分布していた。台風 5 号以後では、後浜、“中浜”、前浜の 3 帯*に分かれて分布し、後浜に巨礫、前浜に小礫が多く発見される傾向があった。

(2) 移動方向

投入地点より西方で試験礫が発見されたのは 8 月 6～15 日の間で、その最大移動距離は 8 月 6 日 5m、8 日 13m および 15 日 5m にすぎなかった。この期間にも大多数は東方で発見され（図-2）、8 月 15 日（10 日後）以後は全発見礫が東方に分布し、最大移動距離も日

表-2 調査日程と主要追跡結果

年 月 日	経過 日数	調 査 事 項	発見礫 の個数	ビー玉 発見数	最遠発見礫 の距離(m)	全発見礫 分布重心 距離(m)	移 動 速 度 (m/day)							ビー玉 重 心
							最 遠 礫	粒 径 (φ) 別 分 布 重 心						
								全 礫	-9	-8	-7	-6		
1975年 8月5日	0	試験礫投入	約7 000	—	0.0	0.0	52	8.7	5.4	5	7	27		
6日	1	追 跡	300	—	E 147 W 5	8.7		13						
8日	3	追 跡	E 320 W 15	—	E 255 W 13	35		2.7						
15日	10	追跡、青色 ビー玉投入	227+	—	E 520 W 5	54								
16日	11	追 跡	9	—	E 865	380	345		200	400				
17日	12	追 跡	20	—	E 1250	—	385							
9月9～11日 19日	36 44	追跡、猫目 ビー玉投入 ビー玉追跡	123	C 2 143 C 177	E 6 250	1 535	56	2		2	5	3	10	
10月2日	58	ビー玉追跡	—	C 190	—	—							16	
10日	66	ビー玉追跡	—	C 64	—	—								
11月2～3日	89	追 跡	148	C 57 B 9	E 5 960	1 640	80						4	
1976年 2月5～6日	174	既存礫調査	—	—	E 14 000	—								

* 調査海浜の海浜幅が広いので、本報では試験礫の発見位置を 図-2 に示す海浜の 3 領域で記述する。

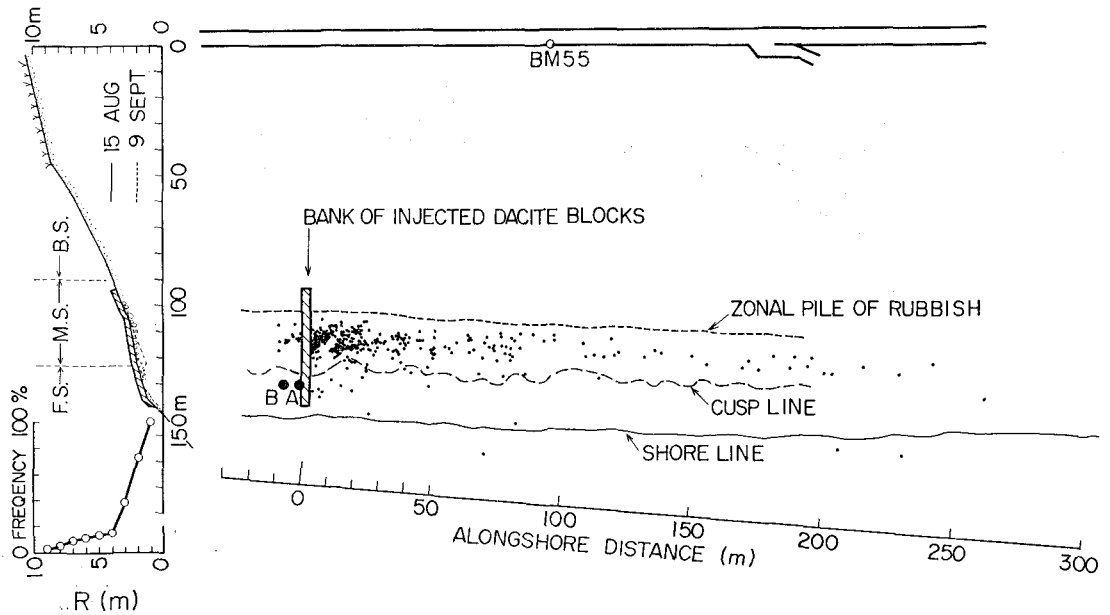


図-2 試験礫投入地点付近の海岸平面形、投入礫の敷設堤、8月8日における発見礫の分布(ドット)、ビー玉投入地点(A:8月15日, B:9月9日)(以上は右図)、投入地点の海岸縦断面と敷設堤位置(左上)、および波の打上げ高(R)の累加頻度%(左下)

を追って増加した(表-2)。したがって、追跡調査期間中における漂砂の卓越方向は東向である。

(2) 試験礫の見掛体積の変化

図-3は、投入礫および発見礫の見掛体積を $2 \times 10^3 \text{ cm}^3$ ごとに階級区分し、それぞれの階級に属する礫の個数の頻度%を示したものである。これによると、8月5日および8日の体積別個数分布は投入礫のそれとほぼ同様であるが、台風5号および6号の後の9月9日と11月2日の分布は台風以前のそれと著しく異なり、細粒な礫の増加が顕著である。

図-4は、追跡調査日ごとの全発見礫の平均見掛体積の経時の変化を示す。これと図-3からみて、試験礫の体積の減少は台風期に大きく、それ以外のときには僅小であることがわかる。台風期における礫体積の減少は、

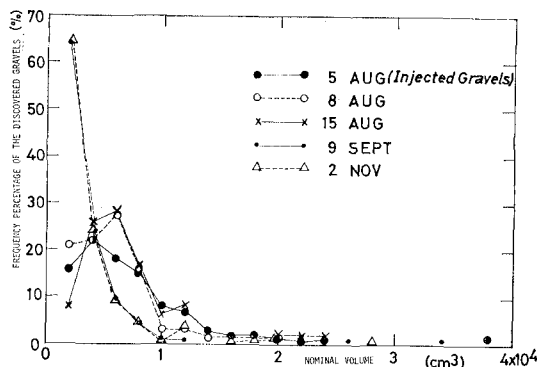


図-3 投入礫および発見礫の見掛体積の頻度分布

平均的には図-4からみて $4 \times 10^3 \text{ cm}^3$ 程度であり、また実際にも図-3の台風前期および後期の頻度分布曲線の差 ($0.4 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^4 \text{ cm}^3$ の区間の体積差) からみて、 $4 \times 10^3 \text{ cm}^3$ となり、平均値と一致する。

図-5に、9月と11月における発見礫体積の変異系列を示す。ここでは、汀線方向の0.5および1km区間ごとにおける発見礫上位5個の平均体積を示した。これによると、変異系列は9月と11月でほぼ同様の傾向

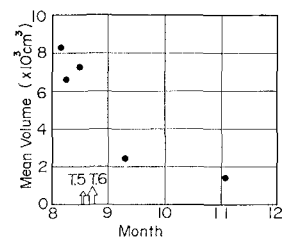


図-4 発見礫の平均見掛体積の経時の変化

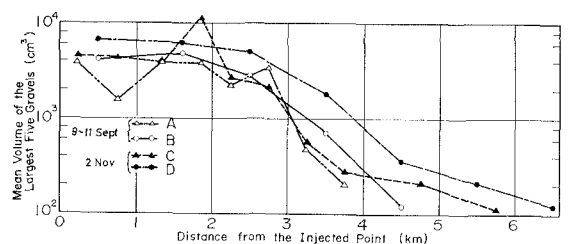


図-5 発見礫体積の変異系列 (A, C:0.5km 間隔の平均, B, D:1km 間隔の平均)

を示し、変異系列の勾配（体積の減少率）は投入地点から約 2.5 km までは小さいが、それから約 4 km までの区間で大きくなり、それ以後では再び小さくなっている。9 月と 11 月の体積の絶対値を比較すると、0.5 km 区間ごとについてはほぼ等しいが、1 km 区間ごとでは 11 月が少し大きい。これは、主として 9 月から 11 月の間における細粒の海浜堆積物の移動に伴って粗粒礫が再露出したことに起因すると考える。

(3) 試験礫の形状変化

試験礫の細長率（長径／短径）の経時的变化（図-6）をみると、平均値の増加もあるが、細長率の範囲の増加が著しい。また細長率の変異系列（図-7）をみると、B.M. 49（9 月）、B.M. 48（11 月）付近（投入地点から約 2 km）までの区間では、細長率が 4 内外までの広範囲に分布するが、それ以後では 3 以上のものが少なくなる。この細長率の急変部は発見大礫の体積急減部（図-5）と位置的にはほぼ一致する。

投入礫の円磨度は 0.3~0.5 であったが、台風期以後における発見礫の円磨度はすべて 0.5~0.9 となり、0.8 以上の円磨度が 9 月には全発見礫の 33%，11 月には 43% を占めるようになった。

以上の事実と観察結果からみて、試験礫は移動に伴って次第に扁平、細長、かつ丸味を増しつつ、少しずつその体積を減じてゆくが、細長率が 4 内外にまで達すると 2 つに割れて体積および細長率が急減する、といった摩擦および破壊（おそらく衝撃破壊）過程をへて、その形状および体積が変化していくものとする。

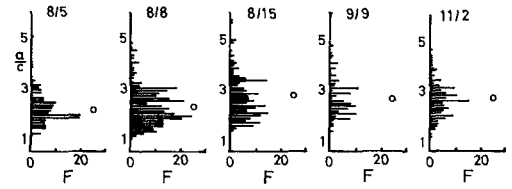


図-6 細長率（長径／短径）の頻度分布の経時的变化（白丸は平均値）

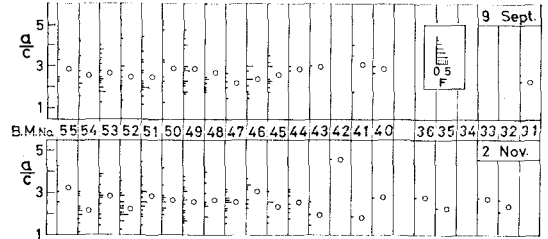


図-7 細長率の頻度分布（約 250m 区間ごと）の変異系列（白丸は区間ごとの平均値）

(4) 発見礫およびビー玉の移動速度

図-8 は、横軸に投入後の経過日数、縦軸に投入地点からの距離をとって、各追跡時点における次の 4 要素、

1. 礫の重心分布（ ϕ スケールで 5 階級に区分した粒径ごとの礫分布の重心）
2. ビー玉の分布重心
3. 最遠発見礫の距離
4. 最遠発見ビー玉の距離

をプロットしたものである。この図から、各要素の各期

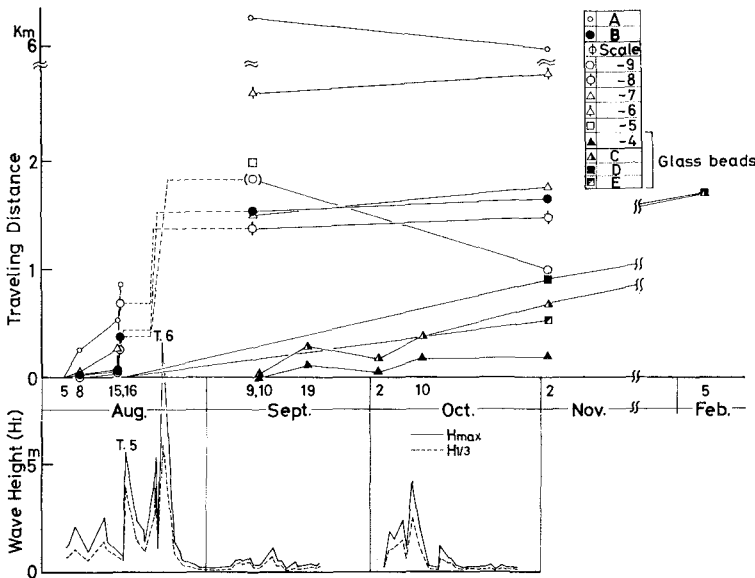


図-8 試験礫およびビー玉の移動距離と波高の経時的变化

A：最遠発見礫，B：全発見礫の分布重心， ϕ ：発見礫の粒径別（ $\phi=-9\sim-5$ ）の分布重心， $\phi=-4$ （ $\blacktriangle$ ）と E：ビー玉重心（8/15，9/9 投入），C，D：最遠ビー玉（8/15，9/9 投入）

間ごとの移動速度を求めると、表-2を得る。これらの図表によると、移動速度には次のような傾向がある。

1. 最遠礫の移動速度は、台風期以外では約 50 m/day、台風 5 号のときは約 350 m/day、台風期を含む 8 月から 2 月の約半年間平均では約 80 m/day である。
2. 粒径別の礫分布重心の移動速度は、粒径が小さくなるほど大きい。
3. 礫分布重心の移動速度は、全発見礫でも粒径別にみても、台風期以外では数 m/day であるが、台風 5 号時にはその約 100 倍である。

4. 追跡結果に対する考察

(1) 海象条件との関係

上述の試験礫追跡結果と追跡期間中における海象条件とを比較するために、建設省沼津工事事務所原観測所(図-1のW地点)での波浪観測結果を使用した。原観測所では、汀線より 150m 沖合の水深 20m 地点に設置されたパイプロトン式波高計によって、毎日 2 時間ごとに 20 分間の連続観測を行なっている。

本研究では、1 日の中で平均波高が最も大きな 20 分間を採用し、その 20 分間の連続記録から最大波と 1/3 有義波の波高および周期を求め、これらをその日の代表波の特性とした。このように決定した入射波高(最大波および 1/3 有義波)の経時変化を図-8 に、また波高と周期の発生頻度を図-9 に、それぞれ示す。

原観測所では、波向観測は行われていず、また風向・風速観測も現在では中止している。また、駿河湾沿岸の気象観測所資料および天気図から、追跡期間中における卓越波向の経時変化を推定することも困難であった。そこで、昭和 47~49 年度における原観測所の風向観測結果⁵⁾から、追跡期間中における調査対象海岸に入射する沖波の卓越波向は S15°W であったと仮定した。

調査海岸での波の打上げ高さは、従来の調査結果によると、 $R/H=0.9\sim 1.0$ であると認められる⁶⁾。図-2 には、 $R/H=1.0$ として推定した波の打ち上げ高さの累加頻度分布が示されている。図-2 によると 8 月 8 日における発見礫の分布限界高度(約 3m)は、8 月 5~8 日

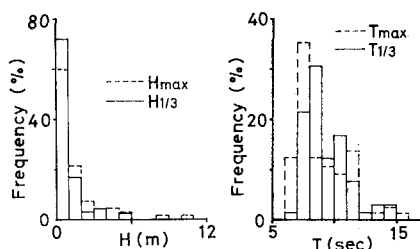


図-9 波高と周期の発生頻度(1975年8月~10月)

の入射波高(図-8)とこの間の平均高潮位(H.W.L.+0.70m)とを考慮すると、推定した波の打ち上げ高(約 2.5m)とはほぼ一致している。台風 6 号を経た 9 月 10 日には試験礫が海岸堤防の直前部でも発見されている。したがって、 $R\div H$ とした従来の調査結果は妥当と考える。

試験礫の移動速度と入射波の輸送エネルギーの沿岸方向成分との関係を検討すると次のようである。まず、波の輸送エネルギーの沿岸方向成分を、式(1)によって算定した。

$$E = \frac{wg}{64\pi} T (H_0 K_R)^2 \sin 2\alpha_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 H_0 : 沖波波高、 T : 周期、 w : 海水の単位重量、 g : 重力の加速度、 K_R : 屈折係数、 α_b : 砕波点における波峯線と汀線のなす角度、である。なお、 E の計算にあたっては、 $K_R=1$ また α_b は沖波の波向より算出した⁷⁾。

図-10 は、式(1)より算定される 1 日平均の輸送エネルギー $\bar{E}$ と発見礫全体および粒径別の分布重心の移動速度との関係を、図-8 の調査結果よりプロットしたものであるが、両者の間には直線関係が認められる。この関係は、従来より研究されている漂砂量と輸送エネルギーとの関係と類似している⁸⁾。しかし、図-10 では試験礫の粒径効果は明確には現われていない。なお、図-10 と同様の検討をビー玉についても行なったが、明確な関係は得られなかった。この原因としては、ビー玉の発見個数の不足のほか、入射波の波向の変化や前浜付近の微地形の効果がビー玉のような小粒径礫の汀線付近における移動機構に大きく関係しているためと考えられる。これに対して、試験礫の場合には、その発見位置と波の打上げ高との関係からみて、その移動に影響を及ぼす入射波の波向が本研究での推定波向とはほぼ同一の

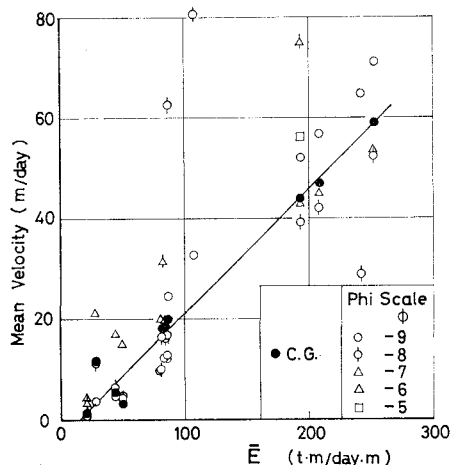


図-10 波の輸送エネルギーの沿岸方向成分と発見礫の移動速度との関係

向であると考えられる。

(2) 既存海浜礫との比較

富士海岸における海浜礫の主要な供給源が富士川であり、漂砂卓越方向が東向きであることは、既存海浜礫の調査で確認されている^{9),10)}。図-11によると、既存海浜礫の体積は、全般に富士川河口から離れるほど減少しているが、田子ノ浦港の東方約4 km付近ではやや大きくなっている。これは、田子ノ浦港の建設に伴って富士川からの礫の供給が断たれたために、田子ノ浦港の東方で侵蝕が起こり、それによって既存大礫が洗い出されたこと、つまり田子ノ浦港の東方が大礫の新たな供給源になっていることを示唆する。試験礫のうち最大5個の平均見掛体積は、投入時には $2.4 \times 10^4 \text{ cm}^3$ で既存海浜礫より著しく大きかったが、台風期後の発見礫の体積は図-11のように投入地点から約2 km東までの区間では既存海浜礫の体積とほぼ同じになった。しかし、投入地点から約2 km以遠になると、試験礫は既存海浜礫に比べて急激に小さくなっている。この原因は、第1に試験礫の強度が図-11に示した既存礫のそれより小さいために、より急速に摩耗されること、第2に試験礫の個数が少なく、かつ1回だけの投入つまり礫供給の連続性の欠除のために、大礫の発見個数が少なくなる、ことなどであろう。

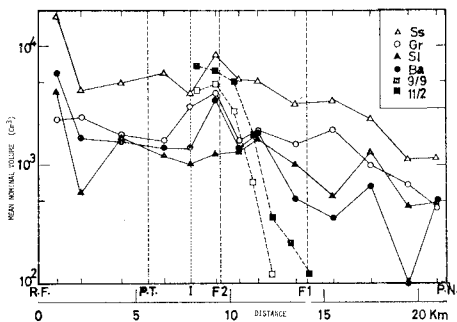


図-11 富士海岸における既存海浜礫（上位7個）および試験礫の平均見掛体積の変異系列
(Ss: 砂岩, Gr: 花崗岩, Sl: 粘板岩, Ba: 玄武岩)

5. あとがき

本研究では、投入礫が1種類であり、また投入個数・

発見個数も充分といえないかも知れないが、礫の粒径変化とそれによぼす汀線方向の距離や摩耗の影響、移動速度と入射波の輸送エネルギーとの関係、波の打上げ高と礫分布との関係、などについて若干の数値的情報を提供することができたと考える。当初の予想では、ここに提示したほどの著しい礫の移動や摩耗が生じるとは思えなかったもので、試験礫として比較的軟質の岩塊を選んだが、今後は強度や組織の異なる数種の岩塊を用いて、海浜礫の変異系列のもつ意義を数量的に追求したい。

おわりに、現地調査および資料収集にあたって多大の御援助をいただいた建設省沼津工事事務所の関係諸官の方々および中央大学 首藤伸夫教授に対し、深甚の謝意を表する。また、現地調査および資料整理に協力された中央大学の助手の方々および学生諸君に感謝する。なお、本研究の一部は、文部省科学研究費総合研究(A) (研究代表者 東京大学 堀川清司教授)によって行ったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 土木学会: 海岸保全施設設計便覧(改訂版), pp. 91~115, 1969.
- 2) 荒巻 孚: 海岸, 犀書房, pp. 117~146, 1971.
- 3) Carr, A.P.: Experiments on longshore transport and sorting of pebbles: Chesil beach, England, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 41, pp. 1084~1104, 1971.
- 4) 沢村孝之助: 7万5千分の1地質図幅「沼津」および同説明書, 地質調査所, 49 p., 1955.
- 5) 建設省中部地方建設局: 昭和47・48・49年度海岸事業調査成果報告書.
- 6) 静岡県富士臨海地区総合開発事務所: 田子の浦港, 第1章, 昭和43年, pp. 37~40.
- 7) U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore Protection Manual, Vol. 1, pp. 4~93~95, 1973.
- 8) 例えば, Savage, R.P.: Laboratory determination of littoral transport rate, Proc. A.S.C.E., Vol. 87, WW2, pp. 69~92, 1962.
- 9) 中山正民: 礫浜における堆積物の諸性質について, 地理学評論, Vol. 38, pp. 103~120, 1965.
- 10) 文献6)と同じ.