

河 口 漂 砂 の 移 動

徳島大学教授 久 宝 保

1. 緒 論

わが国の河川の特質は、山地部河川が多く、河床勾配が急で、風化作用もはなはだしく、不連続線や台風による豪雨が多く、渇水になることも多いことにある。このような河川流はしばしば多量の大きい粒径の河口漂砂を生ずる。

またわが国は太平洋や日本海に面し、台風などによる波浪の作用を受ける海岸線が長く、潮流の変化もいちじるしく、地震などによる地盤変動も少なくない。これらは海岸における土砂を移動させる原因となる。

河口においては河川流の作用としての土砂の運搬や堆積と、海岸における作用による土砂の移動や堆積とが組合わされていることが多い。特に台風のような風浪も大きく、降雨量の大きなきには、その2つの作用が重なつて河口漂砂によつて河口州が発展し、河口閉塞を来し、あるいはその閉塞州が途中で切断されたり連続したりする。

河口閉塞は河川から水流によつて運びだされる土砂量を、海岸における波浪や潮流などの作用でさらに沖へ運び去られないようなときに生ずる。その堆積州を尾州とかあるいは門州とよんでいる。このような州は河川の高水流を海などに放流する作用をはばみ、その水位を上昇させて河口付近の平地にはんらんのおそれを生ぜしめ、河口港を埋没せしめ、河口を利用する船舶や舟筏の通行を阻害する。これらの欠点を有する河口州も、河口を淡水湖化して塩分を防ぎ、自然の堤防として河口付近の防御をしていることもある。

河口閉塞をいかに処理するかの問題について、まず河川流の運搬する土砂量を究明し、その土砂の河口における移動について研究しておく必要がある。本論はそうした考え方から、河川流を主とした河口漂砂の移動について述べたものである。

2. 底質の移動量に関する実験

河床に堆積する底質が河川流によつて運搬される状況について、多くの理論と実験とがあるが、なお普遍的にわが国のような大きい砂礫や、ある特定の河川に用いてきしつかえない妥当な結果は少なく、なお簡単に実験によつて調べるのが便利である。吉野川や高知県の諸河川の水源は石隴山より発しているの、それら河川の底質は近似している。これら河川について研究する目的で、主として吉野川産の砂利をふるい分けたり混合したりして実験に用いた。実験用の水路は幅 6 cm、高さ約 30 cm、長さ約 3 m の両面ガラス張りのもので、その下へ厚さ約 6 cm に砂利を敷き、その上に水流を通じ、流量、水深、水面勾配、水路端より出る砂利量などを求めた¹⁾。

この実験に用いた砂利の代表粒径 d_m としては、

$$d_m = d_{50} \cdot d_{25} / d_{75} \dots \dots \dots (1)$$

を用いた²⁾。ただし、 d_{25} 、 d_{50} 、 d_{75} は粒度累積曲線においてそれぞれ 25, 50, 75% の通過ふるいの目の大きさに応ずる粒径、またふるい分けた砂利ではそのふるいと次のふるいとの間のものが一様の割合で混じているものとして d_m を求めた。

また M_s は Manning 係数に應ずるもので、

$$M_s \frac{v}{(y/d_m)^{1/6} \sqrt{gyJ}} \dots \dots \dots (2)$$

v は流速、 y は水深、 J は勾配、 g は重力加速度である。ただし M_s のうちのガラスの側壁の影響を除くために Manning の平均流速公式を用いることとした。

この実験結果をまとめるために、A.A. Kalinske の方法により³⁾、

$$\frac{q_s}{\sqrt{gyJ} d_m}, \quad \frac{yJ}{(r_s/r_w - 1) d_m} \dots \dots \dots (3)$$

とを求めた。ここに q_s は単位幅の底質移動量、 r_s/r_w は砂利の実質部の比重 (2.65)。これらの結果を表示すると、表-1 のようである。

この結果より、(3) の関係を図示すると、図-1 のようである。ここに $r_s/r_w = 2.65$ を一定とみなしたので、実験結果になおばらつきがあるように思われたが、この結果は Kalinske の示した結果ともよく合っており、さらにそれより d_m の大きいもの (図の下方の点) にも適用される傾向を示している。ここで図より、

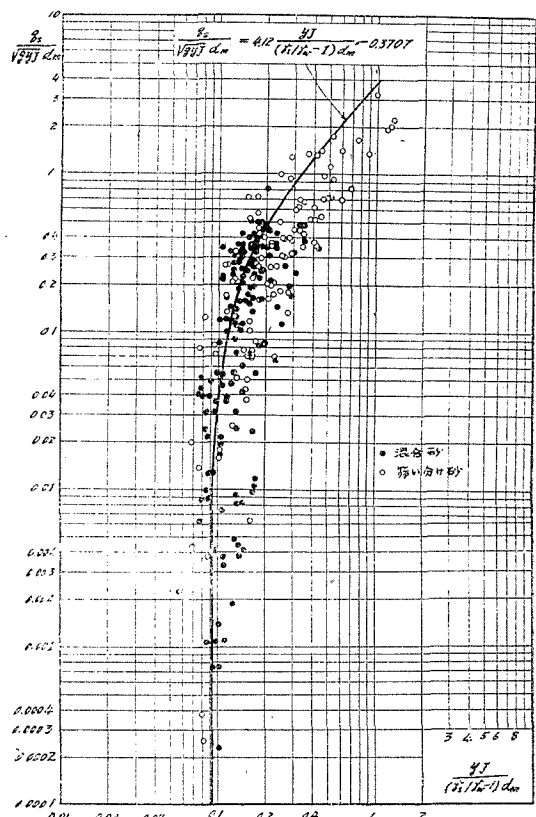
表-1 底質移動量に関する実験結果

d 粒径(mm)	y 水深(cm)	J 水面勾配	U_{*0} 底面流速	Re_{*0} Reynolds数	M_s 底面摩擦係数	q_s 底面摩擦係数	q_s 底面摩擦係数	q_s 底面摩擦係数
d 粒径(mm)	y 水深(cm)	J 水面勾配	U_{*0} 底面流速	Re_{*0} Reynolds数	M_s 底面摩擦係数	q_s 底面摩擦係数	q_s 底面摩擦係数	q_s 底面摩擦係数
$d=0.05-1.0$	0.60	0.020	26.5	1,300	5.4	0.056	0.110	0.130
	0.82	21	36.2	2,440	6.1	0.183	0.360	0.186
	1.04	22	39.6	2,370	6.5	0.353	0.509	0.248
	1.19	17	48.3	4,710	7.2	0.738	0.560	0.218
	1.47	18	52.6	6,560	7.5	0.738	0.976	0.287
	1.59	26	59.5	7,750	6.5	0.677	0.717	0.447
	1.63	21	67.9	9,040	7.5	1.193	1.389	0.370
	1.91	22	66.4	10,390	7.5	1.342	1.407	0.454
	2.07	27	79.8	13,510	8.2	1.553	1.414	0.605
	2.55	28	76.0	16,500	7.1	2.093	1.681	0.774
	1.69	23	68.8	9,510	6.2	1.210	1.253	0.420
	2.33	21	71.5	13,610	7.2	1.832	1.787	0.529
	3.38	26	105.1	50,790	6.5	4.403	3.107	1.607
	4.06	27	101.2	33,620	6.9	3.030	1.971	1.169
	4.80	25	93.1	36,600	7.9	3.670	2.284	1.297
	3.34	25	103.2	28,180	5.4	2.708	2.018	1.233
	2.85	25	55.2	19,890	6.1	1.715	1.385	0.903
	2.57	19	67.9	14,260	5.5	0.993	0.959	0.528
	2.29	18	58.2	10,900	7.2	0.523	0.555	0.446
	1.93	10	47.9	7,580	7.3	0.289	0.446	0.204
	1.75	11	34.9	5,710	6.5	0.132	0.205	0.208
	2.01	09	45.8	7,540	7.5	0.345	0.552	0.195
	1.83	08	40.6	6,050	7.5	0.363	0.539	0.159
	1.69	12	38.6	5,340	8.2	0.350	0.738	0.220
	1.41	12	36.6	4,110	7.1	0.098	0.162	0.185
	0.94	12	34.0	2,770	8.2	0.035	0.071	0.122
$d=1.0-1.4$	1.25	22	39.3	4,180	6.0	0.512	0.586	0.177
	1.59	20	43.8	4,660	6.7	0.700	0.431	0.179
	1.49	20	49.5	5,650	7.0	0.625	0.500	0.192
	1.77	14	45.7	6,260	7.0	0.460	0.526	0.162
	1.77	17	58.2	7,880	8.7	0.730	0.418	0.194
	1.99	26	54.6	9,060	6.5	0.895	0.449	0.333
	2.21	24	58.2	9,830	5.9	1.175	0.354	0.342
	2.43	17	58.3	10,850	7.2	0.637	0.403	0.266
	2.64	18	54.9	11,780	6.3	0.780	0.462	0.303
	2.85	22	58.9	12,780	5.5	1.230	0.630	0.404
	2.63	24	75.1	15,110	6.3	0.747	0.382	0.407
	3.39	15	69.1	17,900	8.9	1.255	0.715	0.327
	3.78	19	75.6	21,900	7.6	1.478	0.710	0.463
	3.70	20	83.7	23,520	7.1	2.093	0.999	0.477
	4.30	30	95.5	31,400	7.0	2.025	0.723	0.832
	4.72	19	88.6	20,500	9.1	1.688	0.790	0.603
	4.48	24	97.7	21,000	9.3	2.192	0.860	0.695
	4.12	14	82.6	16,000	8.5	1.573	0.723	0.605
	3.60	15	79.9	12,000	8.9	0.778	0.450	0.348
	4.97	27	45.9	3,820	6.9	0.465	0.363	0.169
	1.32	21	46.4	5,250	8.6	0.608	0.466	0.179
	1.79	15	57.0	8,750	9.0	0.925	0.727	0.174
	2.42	22	62.5	12,960	6.7	1.250	0.692	0.344
	2.80	16	89.8	21,580	8.7	2.142	1.305	0.289
	2.86	16	64.7	15,870	8.3	0.658	0.397	0.298
	2.29	15	55.4	10,890	8.2	0.258	0.209	0.222
	3.69	14	65.0	19,440	8.6	0.898	0.611	0.315
$d=1.4-1.9$	1.08	18	42.7	3,870	6.8	0.177	0.074	0.096
	1.53	20	57.6	7,350	5.4	0.455	0.212	0.125
	1.75	16	60.6	8,850	5.8	0.538	0.275	0.115
	2.18	16	61.2	11,110	6.8	0.590	0.257	0.143
	2.43	18	66.1	13,450	9.1	0.683	0.266	0.180
	3.63	26	91.2	27,550	9.0	2.007	0.593	0.387
	4.19	06	47.0	16,360	9.5	0.035	0.018	0.103
$d=1.9-2.6$	1.77	26	42.9	5,790	8.0	0.036	0.014	0.078
	1.22	22	56.1	5,700	4.2	0.247	0.128	0.081
	1.75	21	65.6	9,550	6.4	0.872	0.272	0.111
	2.04	27	64.4	11,810	8.0	0.985	0.226	0.166
	3.01	28	94.1	23,620	10.5	1.955	0.403	0.254
	3.24	29	93.5	25,240	9.6	2.055	0.402	0.283
	4.17	33	109.9	39,180	10.5	3.677	0.529	0.415
	4.02	34	105.8	35,460	8.8	2.213	0.359	0.415
	4.39	22	94.7	34,630	10.3	1.685	0.323	0.291
	4.43	21	72.0	26,590	6.5	0.933	0.183	0.280
$d=2.6-3.3$	1.64	20	64.7	8,450	10.9	0.327	0.083	0.075
	2.01	24	67.3	10,770	9.2	0.660	0.138	0.113
	3.99	27	77.2	12,230	10.5	1.110	0.221	0.124
	2.44	31	79.1	15,390	8.6	1.657	0.277	0.175
	3.47	33	87.3	24,160	7.7	2.278	0.304	0.265
	4.45	20	83.6	29,690	9.7	1.080	0.166	0.206
	4.00	19	81.2	25,410	9.9	0.817	0.197	0.176
	3.81	18	71.1	21,590	8.4	0.598	0.105	0.159
	3.01	18	59.1	14,180	7.2	0.082	0.016	0.101
	3.63	15	62.7	18,080	8.2	0.130	0.026	0.126
$d=3.3-4.0$	1.26	37	54.2	3,510	7.2	0.002	0.00076	0.087
	1.64	30	59.8	7,920	7.7	0.025	0.0038	0.087
	1.79	22	67.5	9,760	10.8	0.118	0.0028	0.099
	2.34	26	67.5	11,800	5.7	0.308	0.004	0.148
	2.11	25	76.2	13,550	11.4	0.553	0.006	0.095
	2.70	27	71.4	15,570	7.7	0.990	0.029	0.128
	3.15	23	86.7	21,520	11.3	1.625	0.211	0.127
	3.57	33	89.4	25,750	7.8	1.973	0.201	0.203
	3.68	33	103.3	30,690	10.0	2.577	0.262	0.214
	3.98	34	112.2	36,050	11.1	3.267	0.267	0.238
	4.37	29	97.4	34,330	9.3	1.848	0.177	0.222
	4.49	22	88.4	32,050	9.6	0.982	0.110	0.174
	4.32	20	88.0	30,680	10.6	0.595	0.071	0.152
	4.14	18	78.5	26,720	9.7	0.363	0.046	0.131
	4.89	15	83.0	19,520	8.6	0.415	0.054	0.129
	1.92	39	75.2	11,600	8.7	0.008	0.00238	0.080
$d=4.0-4.5$	3.48	0.043	95.1	26,700	7.8	0.117	0.0064	0.160
	5.60	39	107.9	31,550	10.3	0.675	0.032	0.151
	4.06	35	104.8	34,330	8.5	0.895	0.051	0.152
	4.14	37	109.3	36,510	10.0	1.415	0.077	0.164
	4.10	33	113.2	37,460	12.1	1.347	0.078	0.145
	4.32	35	108.8	37,950	10.4	1.417	0.077	0.142
	4.22	37	108.6	36,980	9.7	1.308	0.076	0.167
$d=4.5-5.5$	1.25	0.0222	44.1	3,390	6.1	0.0437	0.019	0.102
	1.29	217	50.9	4,820	6.0	0.279	0.121	0.107
	1.56	224	49.8	5,780	6.8	0.820	0.318	0.177
	1.62	249	54.6	6,780	7.0	0.685	0.255	0.147
	2.02	241	48.1	7,730	5.8	1.168	0.383	0.177
	2.09	203	51.5	8,490	6.4	0.503	0.176	0.154
	2.21	266	58.3	10,400	5.9	0.727	0.218	0.214
	2.13	234	57.5	10,700	6.7	0.660	0.226	0.181
	2.27	199	52.5	10,400	7.0	0.498	0.169	0.165
	2.39	199	49.8	10,400	5.7	0.168	0.056	0.173
	2.74	202	46.9	9,200	5.4	0.064	0.024	0.165
	1.96	205	27.6	3,500	3.6	0.002	0.001	0.166
$d=5.5-6.5$	1.23	345	46.0	4,940	5.1	0.199	0.114	0.252
	0.65	322	41.0	5,910	4.3	0.317	0.258	0.124
	1.62	300	50.0	7,030	4.6	0.369	0.199	0.289
	1.57	337	56.3	7,730	5.0	0.473	0.243	0.314
	1.70	327	55.5	8,680	5.7	0.794	0.388	0.248
	2.10	351	52.5	9,640	5.3	0.804	0.351	0.428
	2.11	275	55.0	10,100	5.2	0.990	0.485	0.345
	2.15	236	58.5	11,000	6.1	0.617	0.323	0.302
	2.34	235	55.3	11,300	5.4	0.972	0.489	0.327
	2.56	192	49.9	11,500	5.2	0.323	0.172	0.292
	1.68	174	30.4	4,450	3.8	0.017	0.015	0.174
$d=6.5-7.5$	2.02	345	53.3	9,530	5.9	0.003	0.0006	0.076
	3.52	344	74.9	23,200	7.5	0.392	0.025	0.132
	4.05	292	73.5	26,400	6.4	0.079	0.005	0.129
	4.08	321	75.5	27,300	6.3	0.139	0.008	0.142
$d=7.5-8.5$	2.68	345	46.3	11,000	4.2	0.003	0.0008	0.102
	3.79	370	54.3	15,800	4.3	0.073	0.0045	0.135
	3.46	380	64.5	19,800	5.0	0.071	0.0042	0.146
	3.82	420	80.6	27,300	5.8	0.494	0.032	0.131
	4.34	375	89.5	34,400	7.1	1.572	0.083	0.180
	4.05	385	75.9	34,400	10.2	1.394	0.091	0.128
	4.40	195	63.5	24,700	7.1	0.055	0.013	0.095
	3.92	195	49.4	17,100	4.9	0.126	0.032	0.085
	3.21	245	34.8	9,880	3.2	0.167	0.013	0.087
$d=8.5-9.5$	3.78	191	65.0	14,000	9.2			

d 粒径 (mm)	y 水深 (cm)	J 水面勾配	τ_w 平均流速	Re Reynolds 数	M_s	$\frac{q_s}{\tau_w}$ 底質移動量 (g/cm)	$\frac{q_s}{\tau_w}$ $\sqrt{\frac{J}{(R/L-1)}}$	$\frac{q_s}{\tau_w}$ $(\frac{J}{R/L-1})$
$d_m = 0.15$								
	0.70	0.0392	52.3	3 660	7.4	0.067	0.022	0.006
	1.20		400	39.0	4 200	4.5	0.033	0.008
	1.07		405	53.9	5 170	7.0	0.176	0.048
	1.20		395	53.3	6 120	6.3	0.250	0.062
	1.21		415	66.5	7 220	8.1	0.462	0.115
	2.05		335	46.6	8 620	4.3	0.404	0.086
	2.03		330	55.7	10 150	4.6	0.756	0.193
	1.77		280	74.7	11 770	9.6	1.213	0.305
	1.99		265	54.9	9 770	6.3	0.659	0.161
	1.71		280	53.3	8 170	6.4	0.756	0.194
	1.70		268	45.3	6 900	5.3	0.447	0.117
	1.48		275	45.4	6 020	5.7	0.133	0.037
	1.40		275	42.0	5 280	5.4	0.013	0.004
	1.27		285	28.8	3 300	3.9	0.005	0.001
$d_m = 1.07$								
	0.29		489	20.8	540	4.8	0.056	0.0087
	0.35		400	28.9	920	6.6	0.294	0.045
	0.58		418	46.2	2 410	7.5	2.823	0.339
	0.75		370	44.8	3 020	6.6	0.602	0.406
	0.94		367	40.3	3 400	5.0	0.840	0.509
	1.08		352	40.2	3 890	4.9	0.723	0.445
	1.06		315	47.3	4 500	6.3	0.751	0.462
	1.27		322	45.7	5 760	5.2	0.765	0.427
	1.25		295	41.6	4 670	5.0	0.599	0.316
	1.01		283	43.6	3 950	6.1	0.439	0.292
	0.85		270	42.8	3 340	4.4	0.196	0.145
	0.86		272	33.9	2 620	5.2	0.013	0.009
	0.67		250	31.7	1 900	5.9	0.005	0.004
	0.58		258	29.4	1 530	6.0	0.012	0.010
	0.61		248	21.7	1 190	4.3	0.002	0.001
	0.55		240	19.0	950	4.1	0.000	0.000

d 粒径 (mm)	y 水深 (cm)	J 水面勾配	τ_w 平均流速	Re Reynolds 数	M_s	$\frac{q_s}{\tau_w}$ 底質移動量 (g/cm)	$\frac{q_s}{\tau_w}$ $\sqrt{\frac{J}{(R/L-1)}}$	$\frac{q_s}{\tau_w}$ $(\frac{J}{R/L-1})$
$d_m = 1.06$								
	0.51	0.0565	52.1	1 510	5.5	0.419	0.350	0.106
	0.66		362	31.5	1 900	5.0	0.403	0.295
	0.68		542	32.0	2 380	6.1	0.495	0.367
	0.87		540	55.0	2 810	4.8	0.444	0.430
	0.97		542	57.1	3 310	4.8	0.675	0.422
	1.13		298	44.7	4 650	4.6	0.829	0.512
	1.20		260	44.3	4 890	5.9	0.780	0.501
	1.07		280	37.8	3 710	5.4	0.501	0.395
	1.02		245	33.1	3 100	4.9	0.292	0.210
	0.96		340	29.1	2 490	4.6	0.173	0.132
	0.77		243	29.0	1 980	4.9	0.067	0.055
	0.55		240	31.4	1 600	6.4	0.043	0.042
	0.76		225	18.8	1 320	3.3	0.009	0.004
	0.70		245	15.7	1 020	2.9	0.001	0.001
$d_m = 1.06$								
	0.43		633	31.4	1 230	6.1	0.272	0.227
	0.50		430	33.0	1 500	5.7	0.308	0.233
	0.67		408	52.5	1 940	4.7	0.407	0.280
	0.59		410	44.3	2 360	7.0	0.458	0.334
	0.80		385	38.4	2 740	5.2	0.543	0.354
	0.92		370	39.4	3 720	4.8	0.580	0.359
	0.94		355	45.4	3 900	5.9	0.577	0.359
	1.07		332	45.4	4 410	5.7	0.577	0.349
	1.23		330	45.3	4 870	5.0	0.633	0.368
	1.37		324	64.8	5 080	7.8	0.620	0.345
	1.04		278	57.5	3 530	7.0	0.290	0.195
	1.02		270	50.0	2 790	4.2	0.225	0.154
	0.94		265	25.4	2 170	3.7	0.060	0.043
	0.81		272	24.3	1 790	3.8	0.120	0.047
	0.67		270	23.3	1 450	4.2	0.020	0.017
	0.57		255	19.7	1 020	4.0	0.003	0.003
$d_m = 2.92$								
	1.34		370	34.4	5 340	5.1	0.018	0.003
	1.59		385	46.4	6 620	4.9	0.011	0.002
	1.71		322	53.8	8 270	5.6	0.007	0.004
	1.94		395	56.8	9 900	5.5	0.159	0.074
	2.18		460	75.9	14 840	6.7	0.658	0.098
	2.73		405	66.8	16 550	6.2	0.547	0.065
	2.91		425	94.3	19 530	5.9	2.007	0.204
	2.36		340	57.4	12 140	5.4	0.021	0.004
	1.83		376	46.2	7 420	4.5	0.001	0.001

図-1 流砂の実験結果



$$\frac{q_s}{\sqrt{g y J} d_m} = 4.12 \frac{y J}{(\tau_s \tau_w - 1) d_m} - 0.3707 \dots (4)$$
 なる関係を推定して、その図に挿入しておいた。この結果は吉野川系の砂利のような、底質が水流によつて輸送される量を与える実験式として用いてよいと思われる。

さて、河川流の底質の輸送力 τ は、

$$\tau_c = \tau_w \cdot y \cdot J \dots (5)$$

で定義されるものとする。もしもその輸送限界力 τ_c で底質が移動しなければ、(4) 式より、 $q_s = 0$ として

$$4.12 \frac{y J}{(\tau_s \tau_w - 1) d_m} = 0.3707$$

$$\therefore \tau_c = 0.09 (\tau_s - \tau_w) d_m \dots (6)$$

とすることができる。

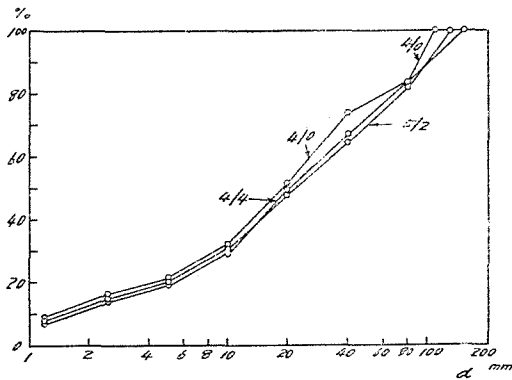
3. 底質の移動量推定法

実際の河川における底質の水流による輸送量を求めることは困難である。ここでは現在までにえられた結果を用いて、比較的合理的にその底質移動量を推定する方法について述べることにする⁴⁾。

まず実際河川の底質は大小種々の粒径の砂利よりなっていることが多いので、できるだけ綿密な底質調査を行つてその粒度累積曲線を求めておく。図-2 は高知県仁淀川下流の中島付近における各横断面ごとの粒度曲線を示したものである。この底質は、横断面内の 30 m 間隔表層の土砂を採取してふるい分け計量して求めたものである。次の図-3・a はその粒度曲線の一つから求めた粒度 1 cm ほどの大きさの砂利の全量に対する % を示したものである。

このように大きさの違った範囲の砂利に関して (1) 式に示したような代表粒径 d_m を用いることは粗雑である。ゆえに (4) 式及び (6) 式において d_m を単に d として、おのおの d について、それらの関係式を用いた方

図-2 仁淀川の粒度累積曲線



が合理的になる。さて $\tau = \tau_c$ においてまさに移動しようとする砂利の粒径 d を d_c とすると (6) 式より

$$\tau \approx 0.09(r_s - r_w)d_c$$

とすることができる。 d_c がまさに移動しようとするような輸送力 τ_c によつて d_c より小さい粒径のものが移動する量は、(4) 式と (5) 式より、

$$q_s = \sqrt{\tau_c / \rho_w} \left\{ 4.12 \frac{\tau_c}{(r_s - r_w)} - 0.3707 d \right\}$$

となり、 τ_c を d_c で示すと、

$$q_s = 4.47 d_c^{1/2} (d_c - d) \dots \dots \dots (7)$$

とすることができる。ゆえに、 q_s は d が小さいほど大となり、 $-d$ に比例する。いま $d=0$ の極限の $q_s = 4.47 d_c^{1/2}$ を求めておくと、図-3・b のような多くの直線を作図することができる。たとえば図の d_c を通る直線と水平軸との間の高さは、 d_c より小さい粒径の砂利の移動量を与える。これがおのおのの d_c に関して計算図示されている。

河口付近の底質は特別な河川工事のないかぎり大した変化がない。ゆえに、ある大きさの粒径の砂利が $p\%$ であるとする、実際に移動しようその粒径の砂利も $p\%$ であるとする。ここに図-3・a を用いて、下の図のそれぞれの縦軸に $p\%$ を乗ずると、その図のような面積の部分がえられる。これらの面積を求めると、それは d_c の大きさの砂利がまさに動きだそうするときそこを輸送されるであろう底質を示すものといえる。このような方法を用いてある高水期間中の底質輸送量を推定することができる。

高水期間中には水流の輸送力 τ に変化を生ずる。水の単位体積重量 r_w はたいして変化がなくても、水深 y と勾配 J とは変化をする。

図-4・a は仁淀川における昭和 29 年 9 月の台風 12 号による中島量水標の水位に水面勾配を乗じた時間的な変化である。ただここでは水面勾配の時間的な変化が測定されていなかったたので、河床と、水面勾配の平均 $1/1400$ を用いた。さて (6) 式より τ_c を yJ で示すと、

$$yJ = 0.09(r_s/r_w - 1)d_c \\ (= 0.1485 d_c)$$

となり、おのおのの yJ に応ずる d_c を求めることが

図-3 底質移動量の推定方法の図解-1

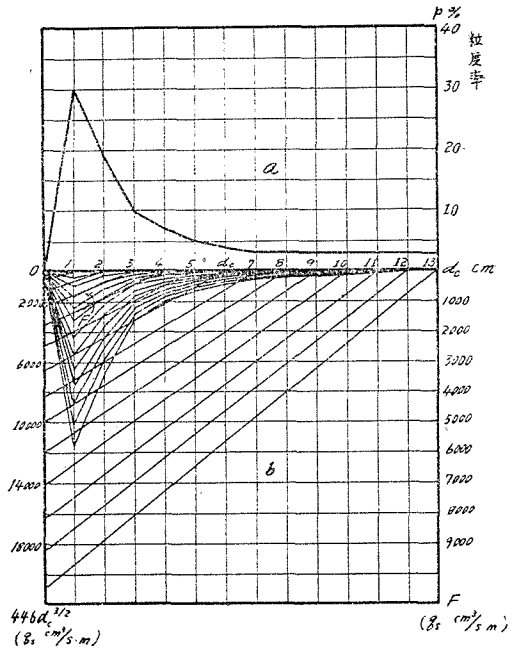
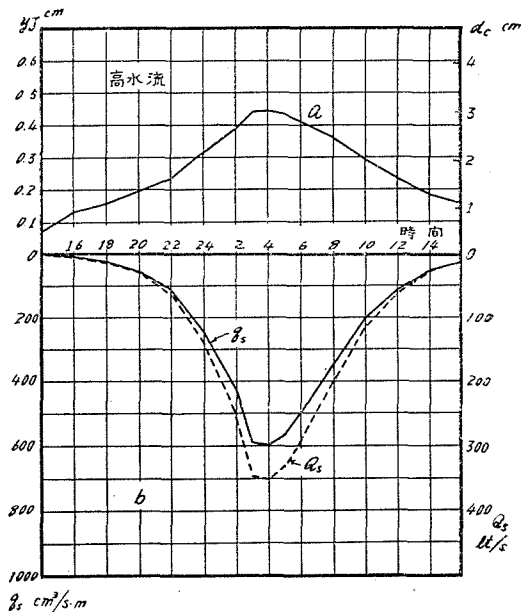


図-4 高水中の底質移動量の推定方法の図解-2



できる。この d_c が求められれば前の 図-3 に示したような面積に応ずる単位巾移動量が求められる。これを示したのがその下の 図-4・b である。この値に河川の中を乗ずるとある高水期間中の底質の移動量の時間的変化が推定される。これを積分すると、大体この高水時間中に $11\,200\text{ m}^3$ 、約 $29\,700\text{ t}$ の砂利底質が移動したものと推定される。この土砂が仁淀川の河口までの $4\,200\text{ m}$ の間に堆積したり、沖へ運び出されたりするものと考えられる。

もしもこのような方法で水面勾配 J の時間的変動がさらに正しく測定され、また増水時中の輸送力 τ_c が減水時中のそれより小さいことが量的に解決されると、この方法による結果の精度を高めることができる。また河口の 2 地点間の 1 高水期間中の底質移動状況の時間的変化が推定できれば、その区間内の河床の洗掘や堆積の状況が求められる。

4. 河口における土砂の堆積の実験

河川流によつて運ばれた土砂が、海のような急に広くなつた所へくると堆積する。その堆積状況を推定するために簡単な基礎的実験を行つた。

幅 4 m 、深さ 1 m 、長さ約 30 m のコンクリート水槽内に 図-5 のような水路をつくつた。

水路は底勾配 $1/100$ 、モルタル底、木製側面、長さ約 10 m 、内幅 40 cm 、深さ約 20 cm 、矩形断面である。この水路の出口で 45° ぐらいの傾斜で約 7 cm 下り、水槽幅 4 m の棚の上にする。この棚は長さ約 3 m で白いペンキで 20 cm 間隔の方眼が引かれている。この台は高さ約 22 cm で水槽へ出る。これに水を入れ水路の所で最初 11 cm 水深があるようにして水流を通じた。流量は 18 l/s である。これに標準砂(豊浦産) 6.5 kg ずつを 19 回ほど入れて水路を流下せしめ堆積状況を写真でうつした。次に那賀川産の土砂を 19 kg ずつ水路に入れて、同様な実験を行い、最後に水槽の端にある造波機によつて波を発生させて同様な実験をした。その結果について次に示してみよう。

(1) 静水中に豊浦産の砂を流しこんだ場合 コンク

リートの方眼のある棚上の水深を 18.3 cm とする。水路に水流を通ずると上流は射流となり、下流は常流となり、

写真-1 豊浦砂の堆積

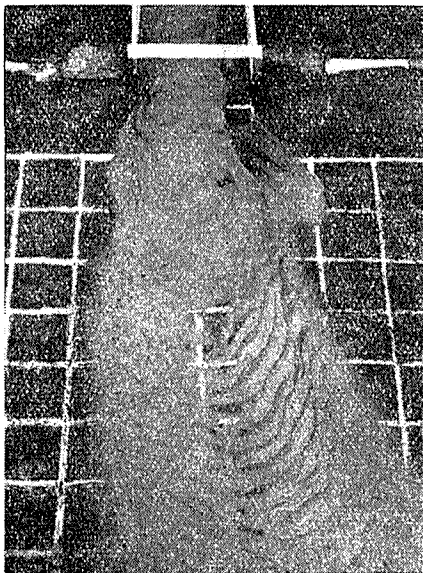


図-5 実験用水槽

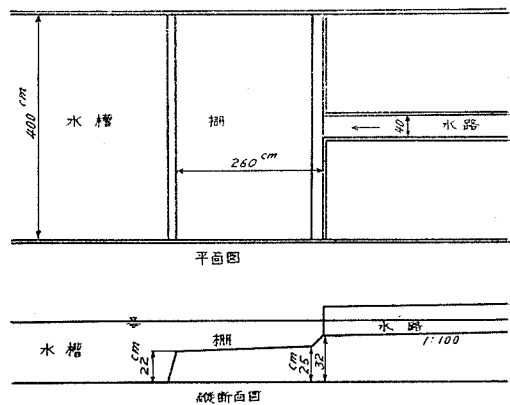
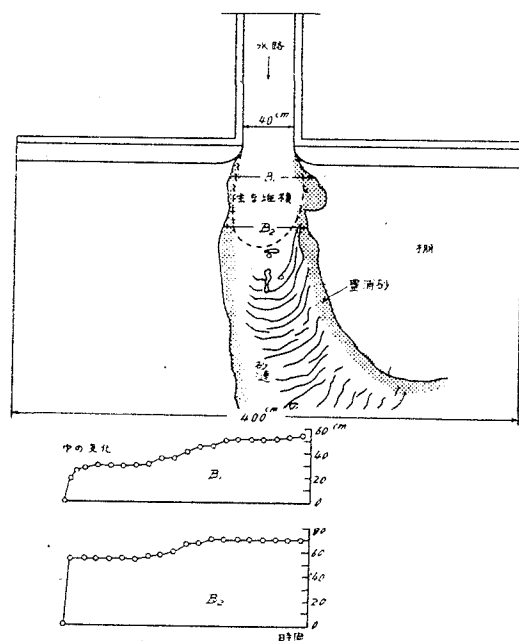


図-6 豊浦砂の堆積状況



その間にボアー状の遷移部を生ずる。ここに砂を投入し、水路出口まで約 3.5 m 間を 4 分ぐらいで流下する。ゆえにビーカーで 6.83 kg ずつ 4 分おきに 19 回流下せしめ、そのたびに写真をとった。最後に水流をとめ水槽の水を除いて堆積状況をしらべた。その結果が写真—1 と図—6 に示したとおりである。

水路より出た砂は棚上の水流によつてなお移動を続ける。その水流は水槽内で左右に大きな渦流を生じ、渦流と水流との境界に小さい渦流を生ずる。この渦流の列の下に伸びた砂の堆積がある。流れの速度の大きい中央部はその図などに示すようにやや堆積量が少なく、なお水流によつて運び去られる。しかし大部分は図に示したような所に堆積し、舌状の円形の州をつくる。この州は表面が比較的平坦で両側が急な勾配（水中安息角）をなし、またその先端はやや平な勾配をなしている。これは水路が水槽に直角な場合であるが、ある傾きをしているとその方向に堆積することが推測される。

(2) 静水中に那賀川の土砂を流し込んだ場合 多量の砂を用いる目的で那賀川産の 3 mm 以下の砂を用いた。その混合状況は表—2 のとおりである。棚のところの水深は 18.0 cm、流量は前と同じく 18 l/s、その他全く前と同様である。ただ土砂は約 18.5 kg ずつ 10 分間隔に流れの中に入れた。その結果は写真—2 及び図—7 のようである。

表—2 粒度分析結果

粒径 (mm)	0.27	0.5	1.0	2.0	4.0	8.3	10
通過率 (%)	2.3	7.3	34.0	65.6	95.1	99.9	100.0

この結果より明らかに、混合土砂であるために前ほど砂漣が発生しない。また前との相違は、出口付近の舌状の円形州が明白にできて、あまり流れの方向に拡がっていない。これは土砂の粒径が前より大きかつたためであると思われる。ゆえにわが国の急流河川の河口漂砂のように、粒径の大きいものはあまり拡がることなく河口付近に堆積することが推定せられる。その形状が表面が平坦で側方が斜面になつていのは、前の豊浦産の水路出口の堆積部分とよくにている。

(3) 砕波中に土砂を流し込んだ場合 前と同様に那賀川産の土砂を砕波中に水路を通じて流入し、その出口の堆積状況をしらべてみることにした。棚の所の水深は前より浅くて 9 cm とし、水路に通ずる水流は前と等しく 18 l/s とした。波は沖波として、週期 0.857 s、波速 128.2 cm/s、波長 109.9 cm、波高 8 cm、(波形勾配 8/109.9) とし、これが台の所で砕け不規則となり、流出土砂部に生じた。その実験結果は写真—3 と図—8 のようである。

この実験では水槽中の浮遊土砂のため混濁して写真による途中の変化をしらべることは困難であつた。なおその結果より明らかに、前に示した舌状の円形州のみができその周辺には堆積をみない。すなわち、土砂の粒径の小さいものは、静水中ならば前の実験のように伸びた堆積をするが、砕波中では浮遊し運ばれて州の周辺には堆積しない。

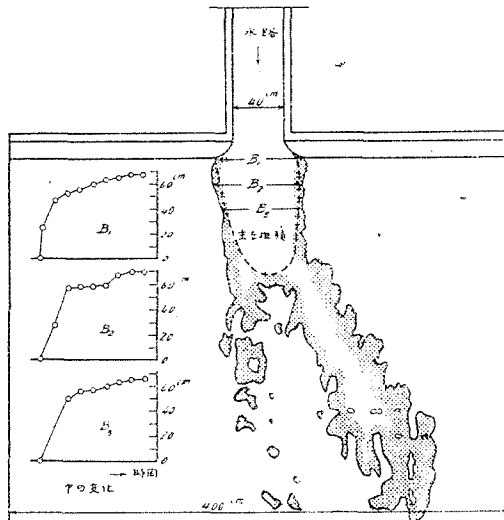
このような事実から、河口漂砂の粒径の大きいものは河口において円形の州をつくるけれども、小さい粒径のものは水流や波の作用によつて運び去られることが予想される。

実際の河口ではもちろんこのような簡単な状況ではありえないし、河川の流量及びそれが輸送する土砂量も変化する ので、円形州が崩さ

写真—2 静水中の那賀川産の土砂堆積



図—7 静水中の那賀川産の土砂堆積状況



れ、そのうちに派流を生じたり、扇状沖積地のようなものが河口の水中に生ずることになるわけである。

5. 仁淀川の河口について

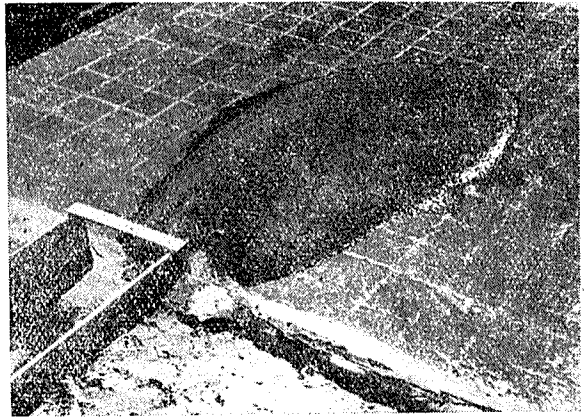
河川流によつて海へ運搬された土砂は、海岸における波力、その他の作用によつて移動する⁹⁾。特に波の強さや方向の季節的、日々の変化、あるいは突発的な台風による波力などによつて、土砂の移動が変化する。常に周期的な変化の波の作用に対しては、漂砂はそれに順応した移動をし、平衡を保とうとして、ある長期間の平均としての河口州の形は変化しないはずである。

前の実験でも明らかなように、河口漂砂の細かいものは、その一部が沖へ運び去られ、他は河口の左右海岸に拡げられる。ここに左右海岸には砂浜が生じ、河口漂砂の十分なる補給があればその砂浜海岸の浸食は防がれ、さらに堆積によつて陸地が造られることになる。ここで常に周期的な波の作用をうけるとすると、その海岸はあまり急な変化をしないことになる。

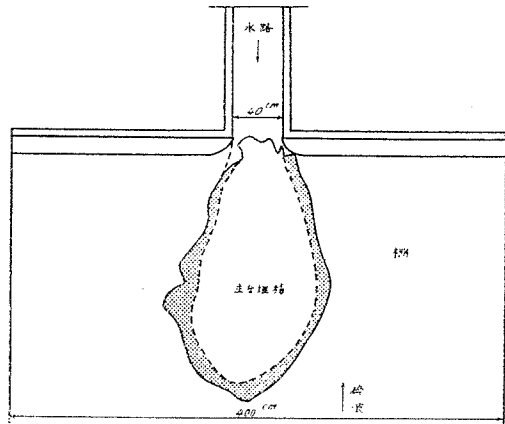
たとえば 図—9 は仁淀川河口の平面図である。その図の横断面を示すと、図—10のような砂浜がある。その図は昭和 16 年 11 月、27 年 7 月、28 年 12 月、29 年 9 月、29 年 10 月、30 年 4 月に実測したものを示している。その図に示すように No. 1~No. 8 までの間は大体同じ海浜断面を与え、大した変化がないが、河口の No. 9~No. 16 までの間は種々に変化している。すなわち、No. 1~No. 8 の間の海辺は大体波力に対して平衡していて、たとえば浸食されても河川の土砂の補給があるものと思われる。

砕波点から岸までの水の運動には、振動的なものと流れになるものがある。沿岸流や離岸流はその流れである。この流れによる漂砂の移動は河川流による土砂の輸送と近似しているが、土砂は主として浮遊しているので粒子はきわめて小さい。これに対し振動的な水の運動によつて海岸の堆砂はジグザグに移動する。この粒子は大きく Johnson によつて浜漂砂とよばれ、前浜に沿つていちじるしい⁹⁾。ゆえに仁淀川の河口でも同じく、No. 1~No. 8 の間の砂はその河川流によつて運び出されたものが岸に沿つて西へ移動したり、再度東へ移動したりするが、主

写真—3 砕波中の堆積土砂



図—8 砕波中の堆積土砂状況



図—9 仁淀川河口平面図

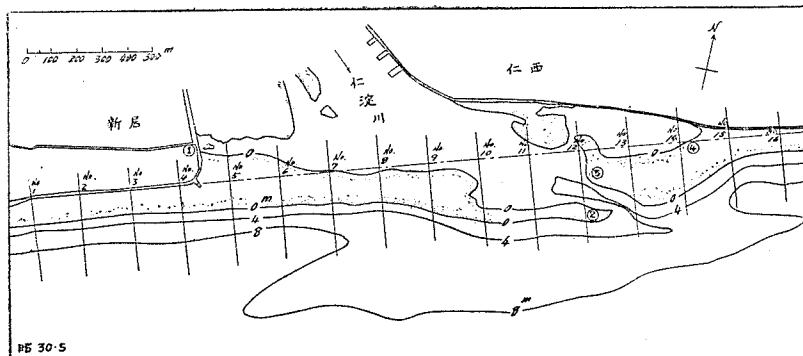
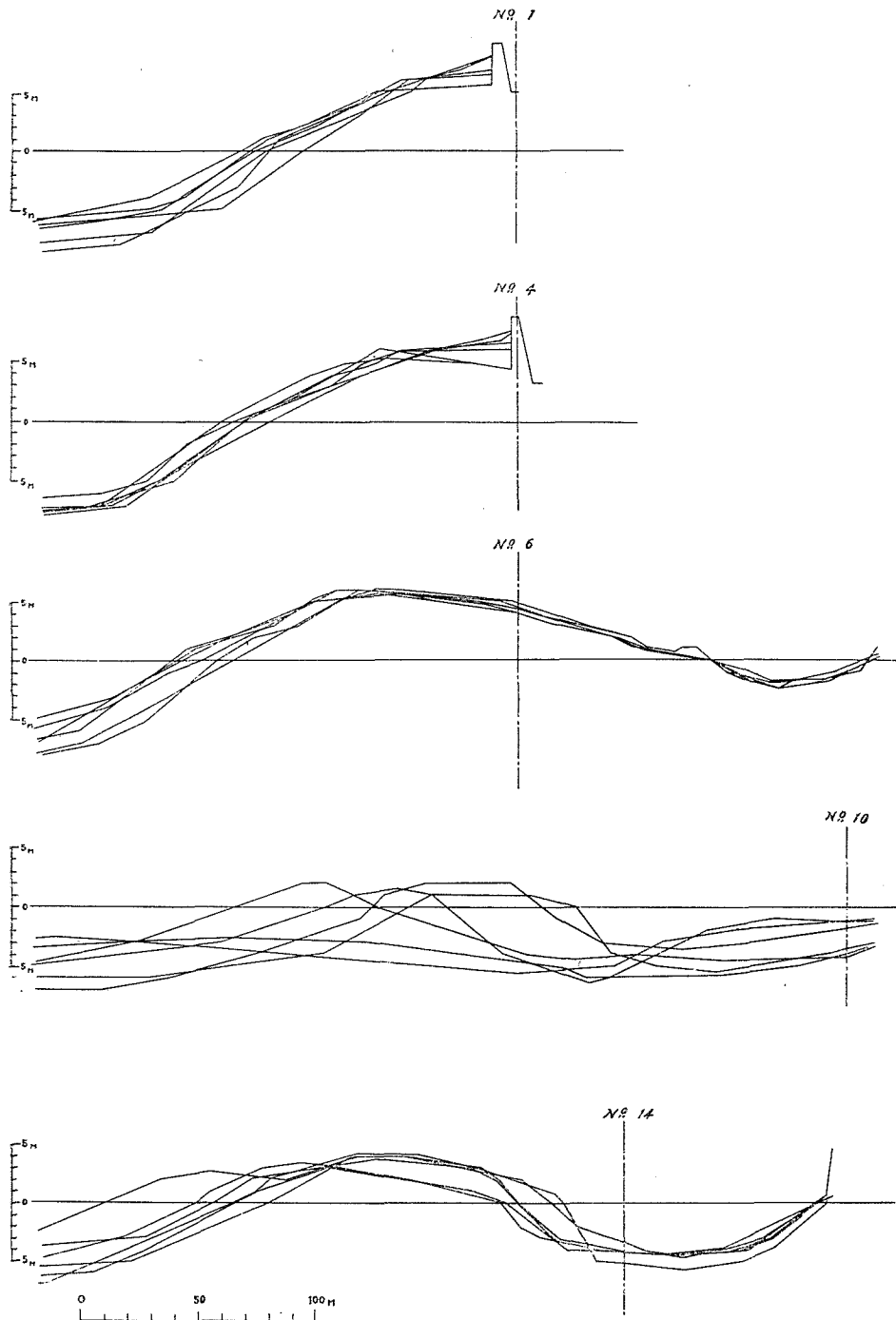


図-10 仁淀川の州の横断面図



として浜漂砂によるものが多い。しかし波の大きいときは碎波帯一面に濁つて、これが沿岸流で運ばれている。

河口の No. 8～No. 16 の間の横断面図に変化があるのは、河口の閉塞州の変化による。大体において仁淀川が高水になるのはやや東より風があり、波もその方向より生じて、河口州は高水時にその左岸（東側）が切断されやすい。その切断部が台風後のやや西からの風によつて、前に示した浜漂砂として移動する土砂によつて連続しようとする。

次に 図-9 によつてその閉塞州の変遷について示してみよう。この図は昭和 30 年現在の州の状況を示している。

その1のところには水門があるが入江になつていて新居村に入っている。ここは明治9年以前に仁淀川の平水路になつていたが、その際には州のNo. 8~No. 10の間が切断して水路となり、閉塞による被害はほとんどなかつた。それを①の上流右岸に水制を出し、この①のところへ千石舟を沈めて閉じ、またその海への出口(No. 1付近)にも千石舟を沈めて閉じた。その後3~4回越流して切れたことがあつたが、昭和13年ころから26年の間に海岸堤防ができています。なおその工事前には①地点の上流まで碎波を生じていた。その①地点の水制より上流の州は500~600年前からあつて、対岸の仁西村の農家の耕地であつた。なお左岸の現在の堤防は昭和25~26年ころできたがその後よく越流破堤して修理している。それより以前はさらに西側に旧堤があつてこれを本堤としていた。

現在では②、③の間の州が切れているが、明治9年ころの図によるとNo. 7~8の間が切れていた。それから、いまから30~50年以前には新居の入江の水流が閉ざされて、州の切れていた部分が東へよりNo. 8~9の所であつた。左岸の図のような水制は約40年前にダルマ籠を用いてつくり、ここに砂が堆積したこともあつたが現在はそれを何回か修理したものである。その下流の方のものは昭和21年ころ破壊した。こちら一帯の堤防は、昭和11~5年ころにできた。

昭和26年11月はNo. 10のところが切れており、その幅も10mぐらいあつた。昭和28年10月にはNo. 11のやや東側が切れていたがその幅はきわめて狭かつた。昨年9月の台風の直後にはNo. 11と12との間が約300m切れていたが、10月になつてさらに広くなつていたが、その沖側に移動した別個の州があつた。ところが本年5月の図-9では図のようにその切断部の幅が150mぐらいになつている。

このような変化があつたが、現在では切れた所が東へ移行している。ただし昔から(約80年ぐらい前から)この閉塞州があり、その切断幅は決して広くなかつた。しかし③と④との間の州は昔はこのような広いものではなかつたが、昭和29年に至つてその図のようになり、さらに広くなろうとし、一応河口の閉塞州の形状が、新居の入江をしめ切つてから現在まで約64~65年にして平衡に近づくようとしているといえる。

以上の平面図及び横断図は建設省中国四国建設局高知工事事務所の測量によつたものであつて、本研究に御協力された同所長 東村一朗氏に深甚の謝意を捧げたい。

6. 結 論

河口に漂砂が堆積し、閉塞しやすい原因としては、河川流の運ぶ土砂量が大であることと、河口がかなり広くて海岸へ達しない間に土砂が堆積する場合で、さらに波力などによる漂砂の沿岸の移動が盛んな場合に生ずるものといえる⁷⁾。ゆえにこの堆積を除くためには、河口の中を狭くし、導流堤を設け、さらには砂防工事などによる河川の土砂の流出を防止するのがよいことになる。

本研究では、河口で堆積しやすい大きい粒径の砂利及び砂の河川流による輸送の実験を行い、それをもととして一高水期間中の輸送土砂量を推定する方法を示した。

さらに基礎的実験によつて河口に運ばれた土砂の堆積状況から、理論的には舌状円形州ができるはずであることを確かめた。

このような堆積土砂は河口付近では変化がはなはだしいが、特別な工事が行われなければ何十年かたつて徐々に安定な形になろうとするように思われる。これを仁淀川を例にして述べた。

さて、これらはいずれも河川流の方からみた河口漂砂の移動がおもであつたが、今後は海岸における波力などの作用からこの河口漂砂の運動を研究すべきであると思われるので、目下いろいろと検討中である。

参 考 文 献

- 1) 久宝 保:「河川漂砂の基礎的性質」, 前回の海岸工学研究会発表(昭.29年)p. 53.
- 2) 同 上:「砂利河川における平均流速について」,(昭.30.5), 土木学会年次学術講演会発表.
- 3) A.A. Kalinske: "Movement of Sediment as Bed Load in Rivers" (1947), Trans. A.G.U., Vol. 28, No. 4.
- 4) 久宝 保:「河川流に関する若干の図式解法」,(昭.30), 土木技術, 第10巻第9号.
- 5) H. Rouse: "Engineering Hydraulics" (1950), p. 834.
- 6) D.W. Johnson: "Shore Processes and Shoreline Movement" (1938).
- 7) 野満隆治:「河川学」, 宮本武之輔:「河川工学」などに示されている.