

段波の衝突と重複に関する実験的研究

正員 北海道大学工学部 五十嵐 日出夫
○正員 同 同 佐藤 幸雄

1. ま え が き

時折日本の沿岸を襲い多大の損害を与えて去る津波や、風浪が Surf Zone で砕けて岸に打ち寄せる砕け波はおおよそ段波、あるいは孤立波のようなものであると考えられている。

段波に関する研究は Boussinesq や Keulegan, または Patterson, その他の人々によってかなり研究されているが、しかし二方向から進行してきた段波が衝突した瞬間の波に対するものはまったくなく、また垂直壁に当たって反射重複した波に対する研究も Stoker によるもの以外には見当たらない。ところが岬の頸部へ二方向より津波が押し寄せた場合(チリ沖地震津波が霧多布を襲った例)、あるいは海浜に構築された海岸堤防や防波堤に流れの性質の強い砕け波が衝突した場合などには、ちょうど段波が衝突し重複したような様相になると思われるので、実際にもこのような自然現象がきわめて多いわけである。それで筆者たちはこのような現象に着目し、まずその第一歩として実験的研究を試みたのである。

2. 実験装置

本実験に使用した設備は北大工学部内水工学実験室に設置されている長さ 15.02 m, 幅 1.01 m, 深さ 0.7 m の水槽で横断面は長方形のものである。図-2.1 に示すようにこの水槽の側壁の一方は全長にわたり厚さ 5 mm のガラス板が張っており、発生した波の形や進行状態の観察が容易にできるようになっているが、他方の壁は滑らかな耐水ベニヤ板を用いてある。また水槽の底はかなん仕上げのトド松板が

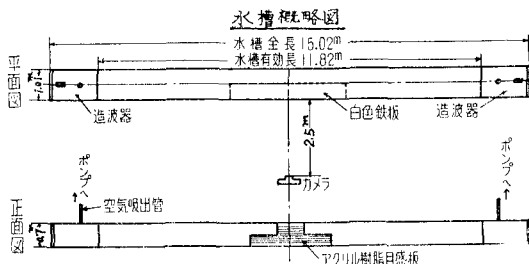


図2-1

張ってあるので、波に対する側壁や底の摩擦抵抗は少ないと考えられる。さらにまた簡単のために水槽の底勾配を水平にした。

次に水路に波を発生させる装置であるが、この装置の主な部分は水を吸い上げ、急に排出して波を起こす箱の部分と、箱内の空気を吸い出すポンプ、およびそれらを結ぶ配管の部分よりなっており、箱は長さ 1.5 m, 幅 1.0 m, 高さ 0.7 m の鉄板製のもので伏せたように取付けてある。またこの箱の水路中央部に面した側の下方には水槽の底より高さ 10 cm, 幅 99 cm の長方形の切欠きが施され、水槽内の水の流入はこの長方形オリフィスを通して行なわれる。また造波箱の上面には空気吸出用の铸铁管と 3 cm × 6 cm の空気吸入孔が設けられていて、空気吸入孔はこの上を滑動する蓋により孔口の大きさを全閉 (3 cm × 0 cm) より全開 (3 cm × 6 cm) まで自由に孔口の大きさを変えることが可能にしてある。この孔口の大きさはその調節により同じ水深でも波高および波速の異なる種々の波を発生させられるが、しかしこの場合の孔口の大小の調節は本実験遂行上便宜的に設けられたものであって実験データとして必要な数値ではない。後述する開度がそれであって、本実験ではこの開度の種類を、開度 6 (3 cm × 6.0 cm) 4 (3 cm × 4.0 cm) 等としている。

実際に波を発生させる方法としては、まず造波箱の上面にある空気吸入孔を閉じて、3 IP の三相誘導電動機と真空ポンプとにより、水槽内の水を造波箱が充滿するまで吸上げ、その後水槽内の水面の動揺が静まるのを待って造波箱

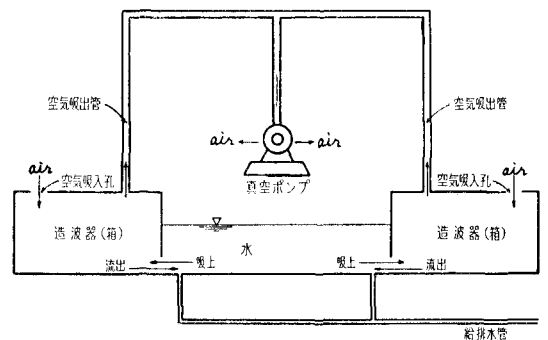


図2-2 空気および水の流通機構図

の上面の空気入口を開けると造波箱内の水位が急激に降下し、同時に箱の下端のオリフィスより水が流出するとオリフィスの前面には跳水が起き波状段波が発生し、この波は水槽の他端へと進行する。この場合空気吸入孔を開口するための装置として、新しく考案した電磁ブーラーを使用した。この装置はリモートスイッチにより自動的に開口でき両端の造波水槽を同時に使用する場合にも両方の空気吸入孔を同時に開口することが可能である。なお、水路ならびに空気排尿管 ポンプなどの配置は図 2-2 に示すとおりである。

3. 波 の 特 性

前述のような実験装置により発生させた波についての解析を行なうためにまず波の様相を調べる必要がある。この実験では既に発生した波についてのみ調べ、造波箱より流出する水流と波の形成の関係は調べなかったが、今後これについても研究する予定である。なお跳水域よりわずかに進行した位置で段波表面の細い乱れは消えて滑らかな波状段波の様相になる。図 3-1 はオシログラフの記録を転写したもので実験観測に用いた波の代表的な形である。

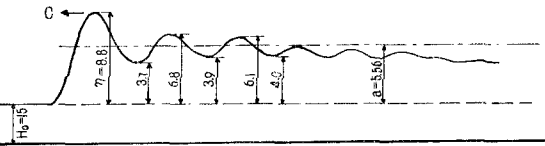


図 3-1

Bazin によれば波状段波の最初の波の波高は後に続くもののそれより大であることに注目し、これを初めの波と名付けている。また Boussinesq は初めの波においては波高が正であるが波頂曲率 $\partial^2\eta/\partial x^2$ は負となり、またこれに続く水面の凹部の部分は η は負であるが波頂曲率は正であることから各部の伝播速度は相ひとしくなり、このような波状段波の存在が可能であることを証明している。また水流中の水粒子の鉛直方向の加速度をすべて無視し段波の波頭の前後の断面においても水圧は静水圧分布をなすものと考え、段波の形状を一つ単なる不連続面の伝播として単一に考えればこの波は理想段波として取扱うこともできる。その他 Keulegan および Patterson は波状段波のいわゆる波頭付近の現象を見るとその波形はクノイド波となると考え、クノイド波の伝播速度の式より波状段波の伝播速度を求めている。Ippen および Harleman も波状跳水の波形がクノイド波とみなして研究を進めている。

これらのクノイド波、理想段波、波状段波の理論においては波高が波の伝播とともに変形しないことを仮定しているが、本実験ではこの点波の伝播とともにその波高は直線的ではあるがいくぶん増大している。この点についての考

表 3-1

水 深 H_0 (cm)	平均波高 a (cm)	η/a	a/H_0
15	5.56	1.58	0.371
"	4.93	1.58	0.329
"	4.47	1.54	0.298
"	3.97	1.51	0.264
"	3.65	1.51	0.244
20	5.72	1.59	0.286
"	4.92	1.57	0.246
"	4.63	1.51	0.232
"	4.20	1.52	0.210
"	4.12	1.42	0.206
"	3.51	1.39	0.176
"	3.15	1.32	0.158
25	4.55	1.71	0.182
"	3.91	1.60	0.156
"	3.82	1.62	0.153
"	3.57	1.46	0.143
"	3.11	1.46	0.125
"	2.97	1.42	0.119
"	2.32	1.42	0.093
30	4.04	1.61	0.134
"	3.56	1.46	0.118
"	3.36	1.46	0.112
"	3.02	1.42	0.101
"	2.69	1.45	0.089
"	2.51	1.36	0.084
"	2.15	1.35	0.072
35	3.37	1.05	0.096
"	3.02	1.39	0.086
"	2.91	1.34	0.083
"	2.62	1.34	0.075
"	2.37	1.31	0.068
"	1.94	1.29	0.055
"	1.89	1.27	0.054
40	3.16	1.36	0.079
"	3.04	1.32	0.076
"	2.72	1.32	0.068
"	2.56	1.29	0.064
"	2.40	1.29	0.060
"	2.12	1.27	0.053
"	1.94	1.24	0.049

究はまだ行っていないが、ここでは波状段波に類似するものとしてデータの整理を行なった。Keulegan および Patterson は波高 a の正段波が水深 H_0 の水路に伝播してゆくとき、 a/H_0 の値が $3/4$ 程度よりも小さい場合には図 3-2 に示すような波状段波となり、 $3/4$ 程度より大きい場合には波形が尖鋭すぎて不安定となり碎けてしまうので、むしろ理想段波に近い現象となることを示し、波状段波の生ずる限界条件として $\eta/a=3/2$ となることを導いている。

Bazin および Favre も同様の実験を行ない、 a/H_0 の値が 0.3 程度より小さい場合に、いずれも $\eta/a=3/2$ となることを認めている。そこでこの実験についてもその点の考察を試みると表 3-1 のとおりである。

なお表 3-1 中の平均波高 a の値は図 3-1 中の波の峰と谷の波高の平均値をとることとした。一例を示すと

$$\text{平均波高 } a = \frac{8.8+3.7+6.8+3.9+6.1+4.0}{6} = 5.55$$

のようである。

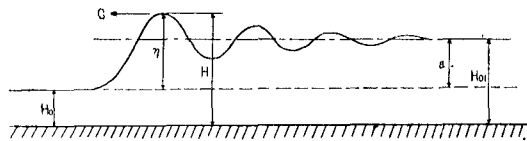


図 3-2

図 3-2 において

- H_0 ；吸上げ水深。
- H ；初めの波（入射波）の水深。
- η ；初めの波（入射波）の波高。
- a ；平均波高。
- H_{01} ；平衡水深。

表 3-1 からわかるように実験値の a/H_0 はほとんど 0.3 程度より小さい値であるが η/a の値は $1.71 \sim 1.21$ まで変化している。このような結果は実験装置に起因するものと思われる。それは造波箱内に吸い上げた水量は比較的少なく放水後箱内の水面は揺れ動きながら非定常に降下し波を形成していくため、波を造り上げるのにあずかる水量も不安定であり典型的な波状段波ができず、したがって図 3-1 から認められるように明確な水深（平衡水深） H_{01} が存在しない。この点については今後さらに究明する必要があるが近似的には水深の浅い $20\text{ cm} \sim 15\text{ cm}$ 、および水深の深い場合でも波高の高い時には、比較的波状段波の条件に近い値を示している。このような点から本実験により取扱われる波の解析にはクノイド波の特別な場合としての孤立波ならびに理想段波の理論を使って、その波速および水分子の速度などを比較検討することにした。

4. 波速について

波速の測定には二本の電気抵抗式波高計を水路の中央部

造波箱前面より 3 m と 8 m の位置にその間隔を 5 m にとって設置し、片方の造波箱のみを使用した。波が二本の波高計を通過する状態と時間とをペン書オシログラフを使って記録した。実測された波速は二本の波高計間の平均波速となる。波高も同時に記録したが、二本の波高計間でやや波高が変化するが、前述のとおり直線的であるのでその平均波高をとり波速と関係づけることとした。測定値は表 4-1 のとおりである。また多くの実験者がこの種の波について試みているように横軸に η/H_0 または H/H_0 、縦軸に $C/\sqrt{gH_0}$ をとり、無次元座標系上に表 4-1 の測定値をプロットすると図 4-1 のようになる。また図上に本実験の測定値と比較するために、代表的な孤立波の波速の理論式と理想段波の式を挿入してみた。

① は Rayleigh Boussinesq の式で

$$C^2 = gH_0 \left(1 + \frac{\eta}{H_0} \right)$$

②、③ は Mc Cowan および Weinstein の式である。

表 4-1

吸上げ 水深 $H_0(\text{cm})$	開度	波度 η (cm)	$\sqrt{gH_0}$ (m/sec)	実測値 C (m/sec)	$\frac{C}{\sqrt{gH_0}}$	η/H_0
20	6	7.0	1.40	1.698	1.212	0.350
		8.1	"			0.405
	5	6.3	"	1.692	1.208	0.315
		7.8	"			0.390
	4.5	5.4	"	1.667	1.190	0.270
		6.6	"			0.330
"	4	5.0	"	1.608	1.148	0.250
		5.9	"			0.295
	3.5	3.9	"	1.582	1.130	0.195
		4.9	"			0.245
	3	2.8	"	1.538	1.098	0.140
		4.2	"			0.210
"	2.5	2.9	"	1.575	1.125	0.145
		3.3	"			0.165
25	6	7.0	1.57	1.818	1.158	0.280
		7.8	"			0.312
	5	5.9	"	1.776	1.131	0.236
		6.2	"			0.248
	4.5	4.8	"	1.761	1.122	0.192
		6.2	"			0.248
	4	4.6	"	1.724	1.098	0.184
		5.2	"			0.208
	3.5	4.1	"	1.718	1.094	0.164
		4.5	"			0.180
	3	3.1	"	1.677	1.068	0.124
		4.2	"			0.168
30	6	6.1	1.72	1.901	1.104	0.203
		6.5	"			0.216
	5	5.1	"	1.859	1.080	0.170
		5.2	"			0.173

吸上げ 水深 H_0 (cm)	開度	波度 η (cm)	$\sqrt{gH_0}$ (m/sec)	実測値 C (m/sec)	$\frac{C}{\sqrt{gH_0}}$	η/H_0
30	4.5	4.9 4.9	1.72 "	1.845	1.072	0.163 0.163
"	4.0	4.4 4.3	" "	1.818	1.056	0.147 0.143
"	3.5	3.9 3.9	" "	1.754	1.034	0.130 0.130
"	3	3.2 3.4	" "	1.754	1.019	0.107 0.113
"	2.5	3.0 2.9	" "	1.754	1.019	0.100 0.097
35	6	4.8 5.1	1.85 "	1.961	1.061	0.137 0.146
"	5	4.2 4.5	" "	1.946	1.053	0.120 0.129
"	4.5	3.9 4.2	" "	1.916	1.037	0.112 0.120
"	4	3.5 3.8	" "	1.866	1.010	0.100 0.109
"	3.5	3.1 3.3	" "	1.859	1.006	0.089 0.094
"	3.0	2.5 2.9	" "	1.832	0.991	0.072 0.083
"	2.5	2.7 2.4	" "	1.805	0.977	0.077 0.069
40	6	4.2 3.9	1.98 "	2.016	1.018	0.105 0.098
"	5	3.9 3.8	" "	2.000	1.010	0.098 0.095
"	4.5	3.6 3.6	" "	1.992	1.006	0.090 0.090
"	4	3.3 3.2	" "	1.961	0.990	0.083 0.080
"	3.5	3.1 2.9	" "	1.946	0.983	0.078 0.073
"	3	2.7 2.6	" "	1.916	0.968	0.068 0.065
"	2.5	2.4 2.4	" "	1.887	0.953	0.060 0.060

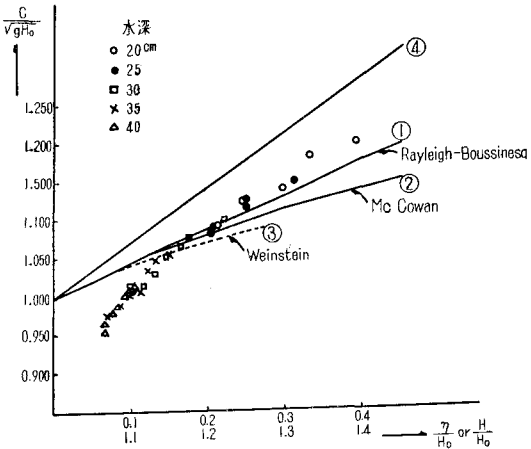


図 4—1

5. 流速について

流速の測定には無接点流速計を使用し、流速計のプロペラの回転数をペン書きオシログラフに記録した。測定した流速は水平方向の水分子の速度であって、鉛直方向の速度はごく小さいと考えられるので無視することにした。本実験において流速計の設置する水深が問題となるので、予備実験として水深 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm の各々の場合について水路底より静水面までの鉛直方向 1 cm 間隔に流速を測った。この分布は実験範囲の水深において深い場合も浅い場合もほぼ S 字状を呈し、静水面下では流速が比較的一様であるが、静水面近くになると急激に速くなって波速に近くなるようである。またこれより流速の平均値は静水面下水深のほぼ 1/3 ぐらいの位置に在ることがわかったので、この位置に流速計をとりつけることにした。

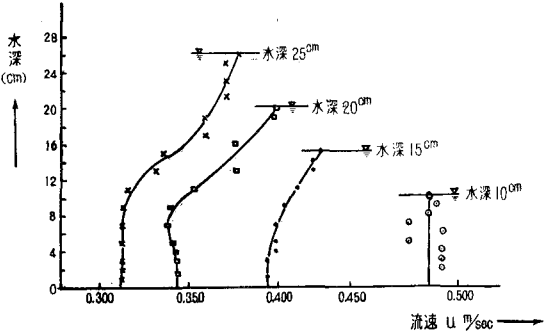


図 5—1

この位置における流速と波高との測定は (6) で述べる。衝突の実験の場合にも同様に行なったもので、その測定値は表 5-1 のとおりで、流速と波高との関係を調べるに当っては波速の場合と同様に横軸に η_2/H_0 を、縦軸に $u_2/\sqrt{gH_0}$ をとって無次元座標系上に測定値をプロットしたのが図 5-2 である。

④ は理想段波の波速の式で

$$C^2 = \frac{1}{2} g (H_0 + H) \cdot \frac{H}{H_0}$$

である。

図 4-1 からわかる大体の傾向は水深が浅い 15 cm ~ 20 cm の場合では比較的理想的段波に近く、水深が深くなるに従い孤立波の波速に近くなることである。また水深 40 cm 以上深くなると波の種類も本実験特有の波となり、上述の理論式とはかなりの違いが示されている。この限界は今の段階では断定はむずかしく、今後多くの実験が必要である。

図上に描かれている曲線①②は理想段波の理論式ならびに孤立波の波頂における最大流速の式で本実験の測定値を比較してみた。この図では図 4-1 の波速の場合にもいえることであるが水深が浅い場合にはやはり理想段波に近づくようである。それで割合水深が浅い場合については段波の理論で検討すればやや実相がは握できそうにも思われる。

表 5—1

吸上げ 水 深 H_0 (cm)	開度	波高 η_2	η_2/H_0	$\sqrt{gH_0}$	u_2	$u_2/\sqrt{gH_0}$
15	4	7.8	0.520	1.21	0.493	0.408
"	3.5	7.0	0.467	"	0.475	0.393
"	3	5.8	0.387	"	0.395	0.326
"	2.5	5.7	0.380	"	0.389	0.322
"	3.5	7.1	0.474	"	0.473	0.391
"	3	6.0	0.400	"	0.404	0.334
"	2.5	5.5	0.367	"	0.392	0.324
"	3	6.3	0.420	"	0.404	0.334
"	2.5	5.7	0.380	"	0.392	0.324
"	2.5	5.5	0.367	"	0.392	0.324
20	5	7.7	0.385	1.40	0.401	0.282
"	4.5	7.2	0.360	"	0.397	0.271
"	4	6.4	0.320	"	0.335	0.239
"	3.5	6.0	0.300	"	0.344	0.246
"	3	5.0	0.250	"	0.395	0.268
"	2.5	4.0	0.210	"	0.253	0.181
"	4.5	7.1	0.355	"	0.379	0.271
"	4	6.5	0.325	"	0.340	0.243
"	3.5	5.5	0.275	"	0.344	0.246
"	3	4.9	0.245	"	0.274	0.196
"	2.5	4.2	0.210	"	0.253	0.181
"	4	6.4	0.320	"	0.343	0.245
"	3.5	5.9	0.295	"	0.344	0.246
"	3	4.9	0.245	"	0.278	0.201
"	2.5	4.2	0.210	"	0.226	0.162
"	3.5	5.5	0.275	"	0.344	0.246
"	3	4.6	0.230	"	0.278	0.210
"	2.5	4.2	0.210	"	0.243	0.174
"	3	5.0	0.250	"	0.274	0.196
"	2.5	4.6	0.230	"	0.243	0.174
"	2.5	4.1	0.205	"	0.243	0.174
25	5	6.1	0.244	1.57	0.348	0.222
"	4.5	5.4	0.216	"	0.322	0.205
"	4	4.8	0.192	"	0.274	0.175
"	3.5	4.4	0.176	"	0.258	0.164
吸上げ 水 深 H_0 (cm)	開度	波高 η_2	η_2/H_0	$\sqrt{gH_0}$	u_2	$u_2/\sqrt{gH_0}$
25	3	3.7	0.148	1.57	0.237	0.151
"	2.5	3.5	0.140	"	0.187	0.119
"	4.5	5.7	0.228	"	0.321	0.205
"	4	5.0	0.200	"	0.292	0.186
"	3.5	4.3	0.172	"	0.235	0.151
"	3	3.4	0.136	"	0.228	0.145
"	2.5	3.3	0.132	"	0.216	0.138
"	4	5.2	0.208	"	0.291	0.174
"	3.5	4.6	0.184	"	0.240	0.155
"	3	3.9	0.156	"	0.246	0.157
"	2.5	3.3	0.132	"	0.218	0.139
"	3.5	4.5	0.180	"	0.235	0.151
"	3	3.9	0.156	"	0.246	0.157
"	2.5	3.4	0.136	"	0.203	0.129
"	3	3.8	0.152	"	0.246	0.157
"	2.5	3.2	0.128	"	0.198	0.126
"	2.5	3.5	0.140	"	0.203	0.129
30	5	5.1	0.170	1.72	0.307	0.172
"	4.5	4.4	0.147	"	0.282	0.164
"	4	4.1	0.137	"	0.235	0.137
"	3.5	3.5	0.117	"	0.226	0.131
"	3	3.0	0.100	"	0.210	0.122
"	2.5	2.7	0.090	"	0.185	0.107
"	4.5	4.7	0.157	"	0.262	0.152
"	4	4.1	0.137	"	0.235	0.137
"	3.5	3.6	0.120	"	0.232	0.135
"	3	2.9	0.097	"	0.210	0.122
"	2.5	2.7	0.090	"	0.187	0.109
"	4	4.1	0.137	"	0.235	0.137
"	3.5	3.7	0.123	"	0.225	0.131
"	3	3.0	0.100	"	0.140	0.081
"	2.5	2.7	0.090	"	0.187	0.109
"	3.5	3.7	0.090	"	0.225	0.131
"	3	3.1	0.103	"	0.210	0.122
"	2.5	2.7	0.090	"	0.181	0.105
"	3	2.9	0.097	"	0.212	0.123
"	2.5	2.7	0.090	"	0.187	0.109
"	2.5	2.6	0.087	"	0.187	0.109
35	5	4.6	0.131	1.85	0.234	0.127
"	4.5	3.9	0.111	"	0.232	0.126
"	4	3.4	0.097	"	0.212	0.115
"	3.5	3.2	0.091	"	0.198	0.107
"	3	3.0	0.086	"		

表 5-1 (続き)

吸上げ 水深 H_0 (cm)	開度	波高 η_2	η_2/H_0	$\sqrt{gH_0}$	u_2	$u_2/\sqrt{gH_0}$
35	2.5	2.7	0.077	1.85		
"	4.5	3.8	0.080	"	0.232	0.126
"	4	3.4	0.097	"	0.212	0.115
"	3.5	3.2	0.091	"	0.198	0.107
"	3	2.9	0.083	"		
"	2.5	2.4	0.069	"		
"	4	3.5	0.100	"	0.212	0.115
"	3.5	3.3	0.094	"	0.198	0.107
"	3	2.8	0.080	"		
"	2.5	2.6	0.074	"		
"	3.5	3.1	0.089	"	0.198	0.107
"	3	2.8	0.080	"		
"	2.5	2.5	0.071	"		
"	3	2.7	0.077	"		
"	2.5	2.5	0.071	"		
"	2.5	2.3	0.066	"		
40	5	3.3	0.083	1.98	0.198	0.100
"	4.5	3.2	0.080	"	0.193	0.097
"	4	2.7	0.068	"	0.177	0.089
"	3.5	2.5	0.063	"		
"	3	2.2	0.055	"		
"	2.5	1.9	0.048	"		
"	4.5	3.1	0.078	"	0.187	0.094
"	4	2.7	0.068	"	0.177	0.089
"	3.5	2.5	0.063	"		
"	3	2.2	0.055	"		
"	2.5	1.9	0.048	"		
"	4	2.8	0.070	"	0.177	0.089
"	3.5	2.6	0.065	"		
"	3	2.3	0.058	"		
"	2.5	2.0	0.050	"		
"	3.5	2.4	0.060	"		
"	3	2.1	0.053	"		
"	2.5	1.9	0.048	"		
"	3	2.2	0.055	"		
"	2.5	2.0	0.050	"		
"	2.5	2.0	0.050	"		

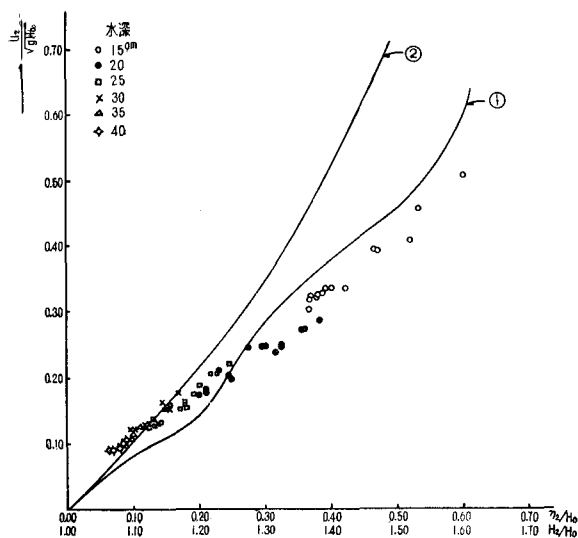


図 5-2

図中 ① は理想段波流速の理論式で

$$\frac{u}{\sqrt{gH_0}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{H}{H_0} \right)^2 - \left(\frac{H}{H_0} \right) + \left(\frac{H_0}{H} \right) - 1 \right\}}$$

② は孤立波の波頂における流速の理想式で

$$\frac{u}{\sqrt{gH_0}} = \frac{\eta}{H_0} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\eta}{H_0} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{\eta}{H_0} \right)^3 \right\}$$

である。

6. 段波の衝突について

測定方法としては水路両端の二つの造波箱を同時に使用し、波を発生させ水槽の中央部で両波を衝突させ、その瞬間に生成した衝突波は波高がきわめて高いことと、波頂の位置が必ずしも予測しがたいことから、普通の電気抵抗式波高計では測定できないので図 2-1 のような位置にカメラを据え付け、写真撮影によった。この場合に使用した撮影装置は大竹謙太郎氏の考案になる簡易ストロボ装置と、オリンパス・ワイドカメラにより重複写真を撮り、左右より進行してきた波が水槽のほぼ中央で衝突した瞬間の波（以下衝突波という。）の波高を測定することに成功した。なお波高の読み取りは、水槽のガラス側壁に縦方向には 2 cm おき、横方向には 10 cm おきに目盛を施した透明なアクリル樹脂板を密着取り付け同一写真中に写し取られるようにした。ネガフィルムは普通の 35 mm ものであるから、波高の判読にはマイクロ・リーダーにより、およそ 52 倍位に拡大した。また衝突以前の二つの波の波高を測定するために水槽中央より左右にそれぞれ 1.5 m づつ離して電気抵抗式波高計を二本設置し、波高計の一本と並べて同一断面内に流速計を設置し、初めの波の波高 η_1 , η_2 と流速 u_2 ならびに衝突瞬間の衝突波高を同時に測定した。また衝突後、二つ

に分かれ後3より続いて進んでくる波と重ね合わされた合成波高についても同一フィルム中に撮影されたので、これからも読み取ることができた。これらの波形を図6-1に示す。

以上のような方法でまず初めに、同一波高の二つの波の衝突を水深を変えて行なった。その結果は表6-1に示すとおりである。図6-1に示す造波箱に水を吸い上げたあとの水槽の水深 H_0 (以下吸上げ水深という), 入射波水深 H_1, H_2 , 衝突波水深 H_{cm} との関係を調べるために横軸に $(H_1/H_0 + H_2/H_0)$ 縦軸に H_{cm}/H_0 を取り、無次元座標軸上に測定値をプロットすると図6-2のようである。この場合はもちろん

$$\frac{H_1}{H_0} = \frac{H_2}{H_0}$$

であって表6-1には H_1/H_0 の値のみをのせた。

図中の曲線は特に理論的意味はないが良く測定値に合うものの一つとして描いたものである。

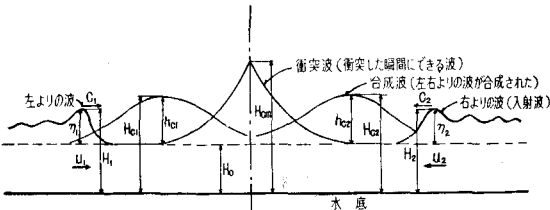


図 6-1

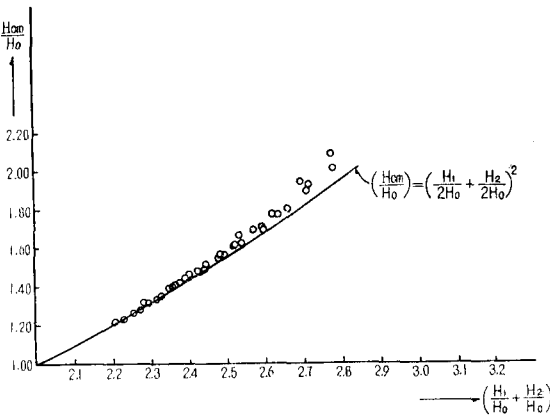


図 6-2

次に水深を一定として左右両造波水槽の開度を変えると波高ならびに流速のそれぞれ異なる二つの波が発生する。これらの二つの異なる波についても前と同様の測定方法により衝突時の衝突波波高の測定した。その結果は表6-2と図6-3に示したとおりである。

図6-2と図6-3を比較してみると図6-2は $H_1/H_0 = H_2/H_0$ の場合で図6-3の場合は $H_1/H_0 \neq H_2/H_0$ 場合であるがいずれも横軸に $(H_1/H_0 + H_2/H_0)$ の Scale を取ること二本の曲線は全く一致し初めから予想されたとおり、同一波

高の二つの波の衝突は波高の異なった二つの波の衝突の特別な場合であることがわかった。

表 6-1

水深 H_0	開度	$H_1(=H_2)$	H (cm)	$\frac{H_1}{H_0}$ ($=\frac{H_2}{H_0}$)	H_{cm}/H_0	$(H_1/H_0)^2$
18.8	3	23.8	31.2	1.266	1.66	2.75
"	4	25.3	36.2	1.346	1.94	3.76
20.0	3	24.8	31.2	1.240	1.54	2.43
"	4	26.3	35.3	1.315	1.77	3.12
"	5	27.7	41.5	1.385	2.08	4.33
21.3	3	26.0	32.2	1.221	1.51	2.28
"	4	27.6	36.0	1.296	1.69	2.85
"	5	28.9	41.0	1.356	1.92	3.68
22.5	3	27.0	32.8	1.200	1.46	2.13
"	4	28.5	36.4	1.267	1.62	2.62
"	5	30.0	40.5	1.328	1.80	3.24
"	6	31.2	45.3	1.387	2.01	4.04
23.7	3	28.0	33.2	1.181	1.40	1.96
"	4	29.5	37.0	1.245	1.56	2.43
"	5	30.7	40.2	1.295	1.70	2.89
"	6	32.1	44.7	1.354	1.89	3.56
25.0	3	28.9	33.6	1.156	1.34	1.79
"	4	30.3	37.1	1.212	1.48	2.19
"	5	31.4	39.9	1.256	1.60	2.55
"	6	32.7	44.2	1.308	1.77	3.13
26.1	3	29.9	34.2	1.146	1.31	1.72
"	4	31.2	37.5	1.195	1.44	2.07
"	5	32.3	40.3	1.238	1.54	2.37
"	6	33.5	44.0	1.284	1.69	2.85
27.3	3	31.0	35.0	1.135	1.28	1.64
"	4	32.2	38.0	1.179	1.39	1.93
"	5	33.3	40.7	1.220	1.49	2.22
"	6	34.4	44.0	1.260	1.61	2.59
28.6	3	32.2	36.0	1.126	1.26	1.58
"	4	33.3	38.6	1.164	1.35	1.82
"	5	34.3	41.1	1.199	1.44	2.07
"	6	35.4	43.6	1.238	1.53	2.34
29.8	3	33.2	36.8	1.114	1.24	1.54
"	4	34.0	39.2	1.141	1.32	1.74
"	5	35.0	41.5	1.174	1.39	1.93
"	6	36.1	43.9	1.211	1.47	2.16
31.0	3	34.2	37.5	1.103	1.21	1.46
"	4	35.1	39.8	1.132	1.28	1.64
"	5	36.0	42.0	1.161	1.36	1.84
"	6	36.8	44.0	1.187	1.42	2.02

表 6-2

吸上げ 水 深 $H_0(\text{cm})$	開 度	波 高 η_1 (cm)	η_1/H_0	開 度	波 高 η_2 (cm)	η_2/H_0	合成波高 H_{cm} (cm)	H_{cm}/H_0	$\eta_1/H_0 + \eta_2/H_0$
15	4.5	7.8	0.520	4.0	7.8	0.520	43.0	2.87	1.040
"	"	8.5	0.567	3.5	7.0	0.467	41.5	2.77	1.034
"	"	8.6	0.574	3.0	5.8	0.387	41.0	2.73	0.961
"	"	8.3	0.554	2.5	5.7	0.380	40.5	2.70	0.934
"	4.0	7.6	0.507	3.5	7.1	0.474	40.0	2.67	0.981
"	"	7.5	0.500	3.0	6.0	0.400	37.0	2.47	0.900
"	"	7.7	0.514	2.5	5.5	0.367	34.0	2.48	0.881
"	3.5	7.1	0.474	3.0	6.3	0.420	36.5	2.43	0.894
"	"	7.2	0.480	2.5	5.7	0.380	34.5	2.30	0.860
"	3	5.7	0.380	2.5	5.5	0.367	30.0	2.00	0.747
20	6	8.8	0.440	5.0	7.7	0.385	45.5	2.28	0.825
"	"	8.9	0.445	4.5	7.2	0.360	44.5	2.23	0.805
"	"	8.9	0.445	4.0	6.4	0.320	43.0	2.15	0.765
"	"	8.8	0.440	3.5	6.0	0.300	41.5	2.08	0.740
"	"	9.0	0.450	3.0	5.0	0.250	39.0	1.95	0.700
"	"	8.9	0.445	2.5	4.2	0.210	37.5	1.88	0.655
"	5	7.6	0.380	4.5	7.1	0.355	39.5	1.98	0.735
"	"	7.6	0.380	4.0	6.5	0.325	38.5	1.93	0.705
"	"	8.0	0.400	3.5	5.5	0.275	38.0	1.90	0.675
"	"	8.0	0.400	3.0	4.9	0.245	36.5	1.83	0.645
"	"	7.8	0.390	2.5	4.2	0.210	36.0	1.80	0.600
"	4.5	7.0	0.350	4.0	6.4	0.320	36.5	1.83	0.670
"	"	6.9	0.345	3.5	5.9	0.295	35.5	1.78	0.640
"	"	6.9	0.345	3.0	4.9	0.245	34.0	1.70	0.590
"	"	6.9	0.345	2.5	4.2	0.210	33.0	1.65	0.555
"	4	6.1	0.305	3.5	5.5	0.274	34.5	1.73	0.580
"	"	6.4	0.320	3.0	4.6	0.230	33.5	1.68	0.550
"	"	6.4	0.320	2.5	4.2	0.210	32.5	1.63	0.530
"	3.5	5.9	0.295	3.0	5.0	0.250	33.0	1.65	0.545
"	"	5.9	0.295	2.5	4.6	0.230	32.0	1.60	0.525
"	3	4.6	0.230	2.5	4.1	0.205	30.5	1.53	0.435
25	6	7.6	0.304	5.0	6.1	0.244	42.5	1.70	0.548
"	"	7.5	0.300	4.5	5.4	0.216	40.8	1.63	0.516
"	"	7.8	0.312	4.0	4.8	0.192	39.7	1.59	0.504
"	"	7.8	0.312	3.5	4.4	0.176	39.0	1.56	0.488
"	"	7.8	0.312	3.0	3.7	0.148	38.1	1.52	0.460
"	"	7.9	0.316	2.5	3.5	0.140	37.5	1.50	0.456
"	5	6.5	0.260	4.5	5.7	0.228	41.0	1.64	0.488
"	"	6.3	0.252	4.0	5.0	0.200	37.9	1.52	0.452
"	"	6.6	0.264	3.5	4.3	0.172	37.7	1.51	0.436
"	"	6.6	0.264	3	3.4	0.136	37.0	1.48	0.400
"	"	6.4	0.256	2.5	3.3	0.132	36.3	1.45	0.388

表 6—2

吸上け 水 深 $H_0(\text{cm})$	開 度	波 高 η_1 (cm)	η_1/H_0	開 度	波 高 η_2 (cm)	η_2/H_0	合成波波高 H_{cm} (cm)	H_{cm}/H_0	$\eta_2/H_0 + \eta_2/H_0$
25	4.5	5.8	0.232	4.0	5.2	0.208	38.0	1.52	0.440
"	"	6.0	0.240	3.5	4.6	0.184	36.8	1.47	0.424
"	"	6.0	0.240	3.0	3.9	0.156	36.0	1.44	0.396
"	"	6.0	0.240	2.5	3.3	0.132	35.3	1.41	0.372
"	4	5.5	0.220	3.5	4.5	0.180	36.8	1.47	0.400
"	"	5.5	0.220	3.0	3.9	0.156	35.5	1.42	0.376
"	"	5.5	0.220	2.5	3.4	0.136	34.5	1.38	0.356
"	3.5	4.8	0.192	3.0	3.8	0.152	34.8	1.39	0.344
"	"	4.8	0.192	2.5	3.2	0.128	34.3	1.37	0.320
"	3	4.1	0.164	2.5	3.5	0.140	33.4	1.34	0.304
30	6	6.2	0.206	5.0	5.1	0.170	42.8	1.41	0.376
"	"	6.2	0.206	4.5	4.4	0.147	42.0	1.39	0.353
"	"	6.1	0.203	4.0	4.1	0.137	41.5	1.37	0.340
"	"	6.2	0.206	3.5	3.5	0.117	41.0	1.35	0.323
"	"	6.1	0.203	3.0	3.0	0.100	40.3	1.33	0.303
"	"	6.2	0.206	2.5	2.7	0.090	39.8	1.31	0.296
"	5	5.1	0.170	4.5	4.7	0.157	40.0	1.32	0.327
"	"	5.1	0.170	4.0	4.1	0.137	39.3	1.30	0.307
"	"	5.1	0.170	3.5	3.6	0.120	39.5	1.30	0.290
"	"	5.0	0.167	3.0	2.9	0.097	38.5	1.27	0.264
"	"	5.1	0.170	2.5	2.7	0.090	38.2	1.26	0.260
"	4.5	4.6	0.153	4.0	4.1	0.137	39.0	1.29	0.290
"	"	4.5	0.150	3.5	3.7	0.123	38.0	1.25	0.273
"	"	4.5	0.150	3.0	3.0	0.100	37.5	1.24	0.250
"	"	4.4	0.147	2.5	2.7	0.090	37.0	1.22	0.237
"	"	4.0	0.133	3.5	3.7	0.090	38.0	1.25	0.223
"	"	4.0	0.133	3.0	3.1	0.103	37.0	1.22	0.236
"	"	4.0	0.133	2.5	2.7	0.090	36.5	1.20	0.223
"	3.5	3.8	0.127	3.0	2.9	0.097	37.0	1.22	0.224
"	"	3.5	0.117	2.5	2.7	0.090	36.0	1.19	0.207
"	3	2.9	0.097	2.5	2.6	0.087	35.0	1.16	0.184
35	6	5.0	0.143	5.0	4.6	0.131	46.8	1.34	0.274
"	"	5.0	0.143	4.5	3.9	0.111	45.5	1.30	0.254
"	"	4.9	0.140	4.0	3.4	0.097	45.0	1.29	
"	"	5.0	0.143	3.5	3.2	0.091	44.2	1.26	0.234
"	"	5.0	0.143	3.0	3.0	0.086	43.5	1.24	0.229
"	"	4.9	0.140	2.5	2.7	0.077	43.0	1.23	0.217
"	5	4.0	0.114	4.5	3.8	0.080	44.0	1.26	0.194
"	"	4.0	0.114	4.0	3.4	0.097	43.0	1.23	0.211
"	"	4.1	0.117	3.5	3.2	0.091	42.8	1.22	0.208
"	"	4.1	0.117	3.0	2.9	0.083	42.0	1.20	0.200
"	"	4.0	0.114	2.5	2.4	0.069	41.5	1.19	0.183
"	4.5	3.6	0.103	4.0	3.5	0.100	42.5	1.22	0.203
"	"	3.6	0.103	3.5	3.3	0.094	42.0	1.20	0.197

表 6-2

吸上げ 水深 $H_0(\text{cm})$	開 度	波 高 η_1 (cm)	η_1/H_0	開 度	波 高 η_2 (cm)	η_2/H_0	合成波波高 H_{cm} (cm)	H_{cm}/H_0	$\eta_1/H_0 + \eta_2/H_0$
35	4.5	3.5	0.100	3.0	2.8	0.080	41.5	1.19	0.180
"	"	3.6	0.103	2.5	2.6	0.074	40.5	1.16	0.177
"	4	3.4	0.097	3.5	3.1	0.089	41.0	1.17	0.186
"	"	3.2	0.091	3.0	2.8	0.080	40.0	1.14	0.171
"	"	3.2	0.091	2.5	2.5	0.071	39.3	1.12	0.162
"	3.5	2.9	0.083	3.0	2.7	0.077	40.3	1.14	0.160
"	"	2.9	0.083	2.5	2.5	0.071	40.0	1.14	0.154
"	3	2.6	0.074	2.5	2.3	0.066	39.0	1.12	0.140
40	6	4.0	0.100	5.0	3.3	0.083	48.3	1.21	0.183
"	"	4.0	0.100	4.5	3.2	0.080	47.2	1.18	0.180
"	"	4.0	0.100	4.0	2.7	0.068	46.5	1.16	0.168
"	"	3.9	0.098	3.5	2.5	0.063	46.0	1.15	0.161
"	"	4.0	0.100	3.0	2.2	0.055	46.0	1.15	0.155
"	"	4.1	0.103	2.5	1.9	0.048	46.0	1.15	0.151
"	5	3.3	0.083	4.5	3.1	0.078	47.0	1.18	0.161
"	"	3.3	0.083	4.0	2.7	0.068	46.5	1.16	0.151
"	"	3.2	0.080	3.5	2.5	0.063	46.0	1.15	0.143
"	"	3.2	0.080	3.0	2.2	0.055	46.0	1.15	0.135
"	"	3.1	0.078	2.5	1.9	0.048	45.0	1.13	0.126
"	4.5	3.0	0.075	4.0	2.8	0.070	45.8	1.15	0.145
"	"	3.0	0.075	3.5	2.6	0.065	45.0	1.13	0.140
"	"	2.9	0.073	3.0	2.3	0.058	45.0	1.13	0.129
"	"	3.0	0.075	2.5	2.0	0.050	44.8	1.12	0.125
"	4	2.7	0.068	3.5	2.4	0.060	45.0	1.13	0.128
"	"	2.7	0.068	3.0	2.1	0.053	44.5	1.11	0.121
"	"	2.7	0.068	2.5	1.9	0.048	44.0	1.10	0.116
"	3.5	2.5	0.063	3.0	2.2	0.055	44.0	1.10	0.118
"	"	2.5	0.063	2.5	2.0	0.050	43.5	1.09	0.113
"	3	2.0	0.050	2.5	2.0	0.050	43.0	1.08	0.100

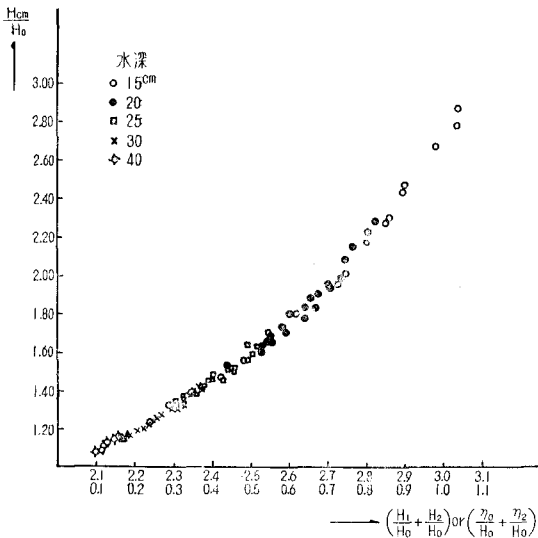


図 6-3

図 6-3 における理論的な式の解明はまだ行なわれておらず、大きな問題として残されているが、実験的に見ると H_{cm}/H_0 と $(H_1/H_0 + H_2/H_0)$ との間には密接な関係があることは確かであるといえる。

最後に衝突した瞬間の波が再び二つの波に分れた場合の合成波波高について測定を行なった。測定は衝突波の測定と同時に行なわれ、表 6-3 の波高 η_1 , η_2 は衝突波波高の測定の場合と同一の値である。合成波波高 H_{c1} , H_{c2} の値は衝突波の場合と同じく、写真撮影により行なったものである。以前行なった同一波高の実験においては図 6-3 のとおり、横軸に $(H_1/H_0 + H_2/H_0)$ 縦軸に $H_{c1}/H_0 + H_{c2}/H_0$ の値をプロットすると Stoker の理想段波が垂直壁により反射した場合の理論式

$$\frac{H_c}{H_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$

式中 H_c ; 反射波水深
 H ; 入射波水深
 H_0 ; 段波到達前の水深

表 6-3

吸上げ 水深 $H_0(\text{cm})$	開 度	波 高 γ_1	H_1/H_0	H_{c1}	開 度	波 高 γ_2	H_2/H_0	H_{c2}	$\frac{H_1}{H_0} + \frac{H_2}{H_0}$	$\frac{H_{c1}}{H_0} + \frac{H_{c2}}{H_0}$
15	4.5	7.8	1.520	31.5	4	7.8	1.520	32.5	3.040	4.266
"	"	8.5	1.567	30.5	3.5	7.0	1.467	34.0	3.034	4.299
"	"	8.6	1.574	29.5	3	5.8	1.387	34.0	2.961	4.232
"	"	8.3	1.554	28.5	2.5	5.7	1.380	34.5	2.934	4.200
"	4	7.6	1.507	32.5	3.5	7.1	1.474	33.0	2.981	4.366
"	"	7.5	1.500	29.5	3	6.0	1.400	32.0	2.900	4.099
"	"	7.7	1.514	29.0	2.5	5.5	1.367	31.5	2.881	4.033
"	3.5	7.1	1.474	27.5	3	6.3	1.420	28.5	2.894	3.733
"	"	2.2	1.480	29.0	2.5	5.7	1.380	30.0	2.850	3.933
"	3	5.7	1.380	27.5	2.5	5.5	1.367	27.5	2.747	3.666
20	6	8.8	1.440	37.5	5	7.7	1.385	38.0	2.825	3.775
"	"	8.9	1.445	37.0	4.5	7.2	1.360	38.5	2.805	3.775
"	"	8.9	1.445	37.5	4	6.4	1.320	36.0	2.765	3.675
"	"	8.8	1.440	37.0	3.5	6.0	1.300	35.0	2.740	3.600
"	"	9.0	1.450	36.8	3	5.0	1.250	33.0	2.700	3.490
"	"	8.9	1.445	35.5	2.5	4.2	1.210	32.0	2.655	3.375
"	5	7.6	1.380	34.7	4.5	7.1	1.355	35.2	2.735	3.495
"	"	7.6	1.380	34.3	4	6.5	1.325	35.2	2.705	3.475
"	"	8.0	1.400	34.0	3.5	5.5	1.275	36.0	2.675	3.500
"	"	8.0	1.400	33.0	3	4.9	1.245	34.5	2.645	3.375
"	"	7.8	1.390	32.0	2.5	4.2	1.210	34.2	2.600	3.310
"	4.5	7.0	1.350	33.0	4	6.4	1.320	33.0	2.670	3.300
"	"	6.9	1.345	32.5	3.5	5.9	1.295	32.0	2.640	3.225
"	"	6.9	1.345	33.0	3	4.9	1.245	31.5	2.590	3.225
"	"	6.9	1.345	30.5	2.5	4.2	1.210	32.0	2.555	3.125
"	4	6.1	1.305	32.3	3.5	5.5	1.275	32.8	2.580	3.255
"	"	6.4	1.320	30.0	3	4.6	1.230	31.2	2.550	3.060
"	"	6.4	1.320	30.0	2.5	4.2	1.210	31.0	2.530	3.050
"	3.5	5.9	1.295	32.0	3	5.0	1.250	32.3	2.545	3.215
"	"	5.9	1.295	30.5	2.5	4.6	1.230	31.0	2.525	3.075
"	3	4.6	1.230	29.0	2.5	4.1	1.205	29.5	2.435	2.825
25	6	7.6	1.304	37.0	5	6.1	1.244	38.0	2.548	3.000
"	"	7.5	1.300	37.3	4.5	5.4	1.216	38.5	2.516	3.032
"	"	7.8	1.312	37.0	4	4.8	1.192	38.0	2.504	3.000
"	"	7.8	1.312	36.3	3.5	4.4	1.176	38.5	2.488	2.992
"	"	7.8	1.312	35.1	3	3.7	1.148	37.5	2.460	2.904
"	"	7.9	1.316	35.0	2.5	3.5	1.140	37.5	2.456	2.900
"	5	6.5	1.260	36.0	4.5	5.7	1.228	36.5	2.488	2.900
"	"	6.3	1.252	36.0	4	5.0	1.200	37.1	2.452	2.924
"	"	6.6	1.264	35.5	3.5	4.3	1.172	36.5	2.436	2.880
"	"	6.6	1.264	34.0	3	3.4	1.136	35.1	2.400	2.764
"	"	6.4	1.256	34.0	2.5	3.3	1.132	34.0	2.388	2.720
"	4.5	5.8	1.232	34.2	4	5.2	1.208	35.5	2.440	2.788
"	"	6.0	1.240	34.0	3.5	4.6	1.184	35.5	2.424	2.780
"	"	6.0	1.240	33.7	3	3.9	1.156	35.0	2.396	2.748
"	"	6.0	1.240	33.7	2.5	3.3	1.132	34.0	2.372	2.708

表 6-3

吸上げ 水深 $H_0(\text{cm})$	開 度	波 高 η_1	H_1/H_0	H_{c1}	開 度	波 高 η_2	H_2/H_0	H_{c2}	$\frac{H_1}{H_0} + \frac{H_2}{H_0}$	$\frac{H_{c1}}{H_0} + \frac{H_{c2}}{H_0}$
25	4	5.5	1.220	33.8	3	3.9	1.156	34.5	2.376	2.732
"	"	5.5	1.220	32.0	2.5	3.4	1.136	33.5	2.356	2.620
"	3.5	4.8	1.192	32.0	3	3.8	1.152	33.8	2.344	2.632
"	"	4.8	1.192	32.5	2.5	3.2	1.128	33.2	2.320	2.628
"	3	4.1	1.164	32.0	2.5	3.5	1.140	32.0	2.304	2.560
30	6	6.2	1.206	39.8	5	5.1	1.170	39.8	2.376	2.654
"	"	6.2	1.206	39.5	4.5	4.4	1.147	41.5	2.353	2.867
"	"	6.1	1.203	39.0	4	4.1	1.137	41.0	2.340	2.833
"	"	6.2	1.206	39.2	3.5	3.5	1.117	40.0	2.323	2.640
"	"	6.1	1.203	40.0	3	3.0	1.100	39.8	2.303	2.660
"	"	6.2	1.206	37.0	2.5	2.7	1.090	38.5	2.296	2.514
"	5	5.1	1.170	39.0	4.5	4.7	1.157	39.1	2.327	2.603
"	"	5.1	1.170	38.0	4	4.1	1.137	38.5	2.307	2.548
"	"	5.1	1.170	37.0	3.5	3.6	1.120	38.0	2.290	2.500
"	"	5.0	1.167	38.0	3	2.9	1.097	38.5	2.264	2.548
"	"	5.1	1.170	37.0	2.5	2.7	1.090	38.0	2.260	2.500
"	4.5	4.6	1.153	38.5	4	4.1	1.137	39.0	2.290	2.583
"	"	4.5	1.150	38.0	3.5	3.7	1.123	38.5	2.273	2.548
"	"	4.5	1.150	37.0	3	3.0	1.100	37.5	2.250	2.483
"	"	4.4	1.147	36.5	2.5	2.7	1.090	37.0	2.237	2.450
"	4	4.0	1.133	37.0	3.5	3.7	1.090	37.5	2.223	2.483
"	"	4.0	1.133	36.0	3	3.1	1.103	37.0	2.236	2.433
"	"	4.0	1.133	35.5	2.5	2.7	1.090	36.0	2.223	2.383
"	3.5	3.8	1.127	35.5	3	2.9	1.097	36.0	2.224	2.383
"	"	3.5	1.117	34.5	2.5	2.7	1.090	35.0	2.207	2.317
"	3	2.9	1.097	34.5	2.5	2.6	1.087	34.5	2.184	2.300

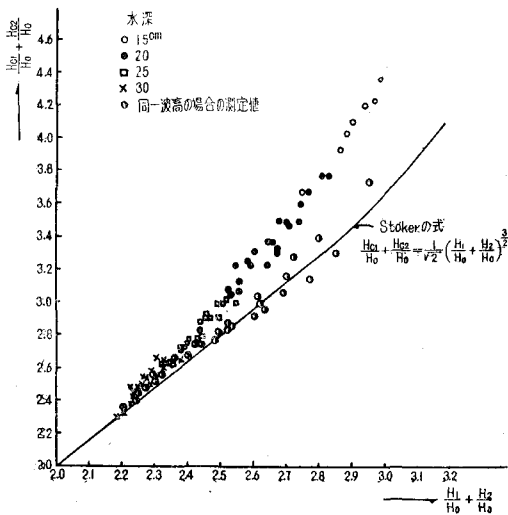


図 6-4

によく一致するため、今回二つの異なった波高の波について同様の方法で測定値をプロットしてみたものが図 6-4 である。図 6-4 では反射波の場合は合成波の場合とは少々異なった結果が得られ、波高 η および水深 H_0 のみではなく、流速 u あるいは縦方向の v にも関係しているとも考えられる。

7. 結 び

この実験報告は現在筆者たちが行っている「段波の基礎的研究」の一部をなすもので、なお一層の実験を重ね、併わせて理論的解明をも企てているものである。研究に当たっては北海道大学工学部教授尾崎晃博士、岸力博士ならびに水工第一研究室大竹謙太郎助手、土木工学科学生松間雄蔵君の労に負うところが多い。深く感謝する。