

実体写真観測による碎波帯の波の性質について

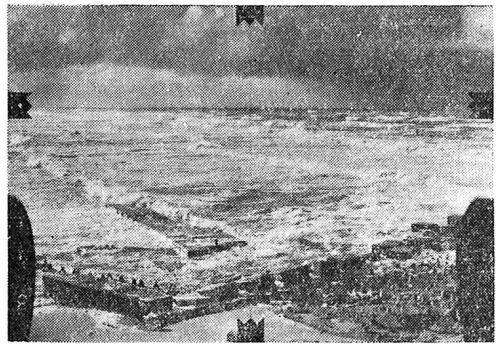
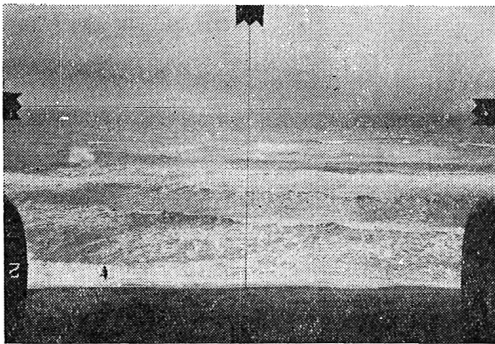
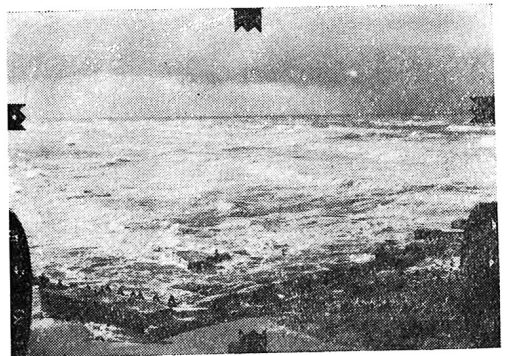
運輸技術研究所港湾物象部技官 井島 武士, 高橋 智晴, 中村 憲一

海岸欠潰或いは漂砂の問題に関して最も重要な要素は海岸における碎波の作用であることは言を俟たない事であり、此のため沿岸碎波の性質に関しては多くの理論及び実験が行われており、碎波直前の波についてはかなり明瞭になつて来ている様に思う。然し碎波によつて生じた碎波帯内における波の性質は殆んど知られていない。理論的には碎波帯の波については W.H. Munk の弧立波理論の応用が提唱されているが、実験的研究の成果は少い。之は大規模な現実に近い碎波帯を実験室内で再現することが極めて困難なことゝ、現在の観測技術によつては正確に此の現象を捕えることが不可能なことになるものと考えられる。著者は連続的撮影装置を有する実体写真機を用いて、昭和30年12月末及び昭和31年3月末新潟海岸において冬期季節風による波を撮影し、之を測定図化することによつて、碎波帯内の波の性質の二、三について調べて見た。此処に報告するものはその結果の概要である。

I. 観測及び図化法

観測は実体写真機1組を用いて海面を撮影し、その前後にストップウォッチによつて碎波点附近の波の周期の目測を行った。観測期間は昭和30年12月17日から23日迄及び昭和31年3月20日から27日までの2回で、実際に使用した資料は後述の如く12月17日14時0分及び3月26日14時24分のものである。

観測に使用した実体写真機及び図化機の構造及び機能は既に発表した^{1),2)}ので詳細を省略するが、実体写真機は画面距離が左右夫々 209.10mm 及び 209.61mm でキヤビネ判のフィルム(長12 $\frac{1}{4}$ 呎, 幅7吋 F-8 航空用)を用い、3~4秒の間隔で連続約30枚の写真を取



ることが出来るもので、フィルムの巻取圧着及びシャッター機構はすべて電接時計及び24ボルト蓄電池により自動的に動作する。今の場合にはシャッターの露出時間は1/100秒とし、又撮影はすべて4.17秒の間隔を以て行つたものである。

観測位置は図-1に示す様に、(1)信濃川左岸の西突堤基部から略W方向に光軸を取つて、水深5m以浅の潜堤前面の波を撮影する地点と(測点 No. 1)(12月)と(2)日和山展望台の西約340mの砂丘上から海岸線に直角(略NNW)の方向で水深約4m以浅の潜堤突端附近の波を撮影する地点(測点 No. 0)(3月)とである。図-1には右側写真機的位置からの光軸方向及び撮影された海面の範囲と水深を示している。

測点 No. 1 では地上に高さ約12mの木製檣を設け、その中に写真機を設置して撮影したが、此の時の基線長は、19.745m、光軸の高さは左右夫々東京湾中等潮位上12.96m、及び13.10mである。測点 No. 0 では砂丘上に小屋を作り、その中から撮影を行つたが、此の際の基線長は18.250m、光軸の高さは東京湾中等潮位上17.82mである。

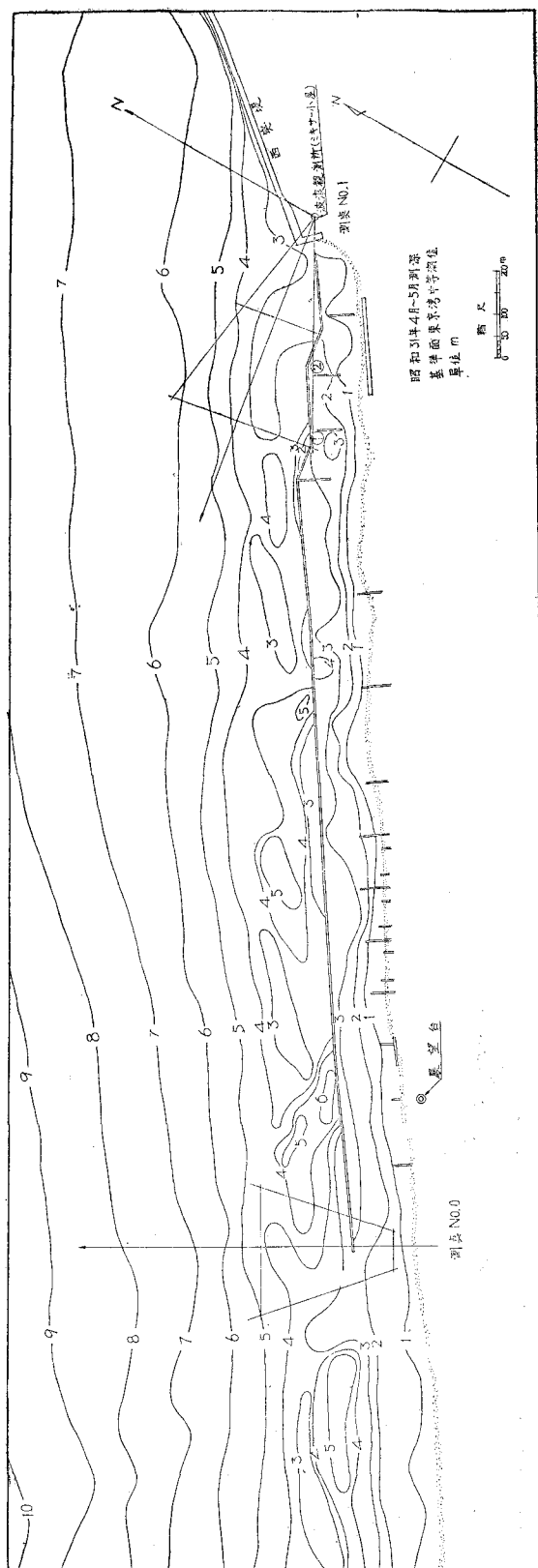
図-1に示した水深は昭和31年4月から5月にわたつて運輸省新潟港工事事務局が行つた測深の結果で測点 No. 0(31年3月)については殆んど実際と相異ないと思われるが、測点 No. 1(30年12月)については約半年間の時期の相異があるので、観測時と多少の相異はあると考えられるが、30年9月末の測深結果と比較すると4m、5m及び6m等深線の位置は殆んど變つていないので、図-1による水深を使用することにした。(30年9月の測深は4m以浅は行つていない。)尚此の測深図の零は東京湾中等潮位を取つている。

測点 No. 0 の前面の潜堤は有孔ブロック潜堤で、天端高は東中位上0.5m、幅1.20mの梯形断面を持つており、又測点 No. 1 前面の潜堤(図化範囲内)は図-1の①附近は粗朶沈床にブロックを置いたもので天端高+0.5m以下、②附近は類似の形で天端高+0.2~0.8m程度となつている。

12月17日14時0分における新潟港内の潮位は+0.65mであつたから、港外潮位は之よりも更に高く、観測時には潜堤は①附近を除いては海面下にあつて認めることは出来なかつた。

測点 No. 0 では3月26日14時24分の港

図-1 新潟港海岸平面図



外潮位は $+0.40\text{m}$ で観測時にも時々天端を認めることが出来る程度であつた。

此処で示すのは主として No. 1 測点における12月17日14時の撮影結果であるから、此の時の気象状態について簡単に述べよう。

12月15日に日本海中部を発達し乍ら横断して東進した低気圧 (980 mb) の通過後16日3時頃から日本海沿岸は北～北西の風域内に入り、南北に走る等高線配置が現われ、18日まで略此の状況が続いたため、日本海岸は16日から風速 10m/s 以上の風による波の洗う処となり、新潟海岸では16日9時前後から NW～W の $10\text{m/sec} \sim 23\text{m/s}$ の風が続き、17日13時には10分間平均風速 23.3m/s を示した。14時における新潟港工事々務所の波高測定用浮標 (水深約 6m) による目測波高は平均 2.1m (相次ぐ高い10個の波) 周期は連続30波について平均9.5秒、最大13.0秒、最小8.5秒となつている。著者のストップウォッチによる目測では20波の平均値 10.9秒 となつた。此の程度の風速及び波の周期は現在までの著者の観測及び新潟港での観測結果から代表的な冬型の波を示しているものと考える事が出来、此処に示す結果は日本海の類似の海岸の代表的な波に当てはめて大きな誤りはないと思う。

3月26日の波は前日から $8 \sim 10\text{m/s}$ の NNE～NE の風が吹送したための局地的風波で、14時の風速は 9.0m/s (NNE) で、新潟港における波高測定用浮標及び波高桿による目測波高は13時及び16時平均 1.7m 、及び 1.5m 周期は平均8.5秒及び7.4秒で、日和山海岸の潜堤前面 (水深約 4m) では12時及び15時に目測平均波高 1.6m 及び 1.4m 、周期6秒及び6.2秒となつている。著者の目測では14時25分に20個の波について平均8.4秒を得た。

撮影した写真はステレオコンパレーター及び図化機によつて測定図化した。此の方法も既に述べたが、No. 1 測点では基線から $250\text{m} \sim 500\text{m}$ の範囲を 5m 間隔で光軸に垂直な、縮尺1/500の断面を描き、之を組合せて等高線を描いた。No. 0 測点では基線から $150\text{m} \sim 300\text{m}$ の範囲を 5m 間隔で断面を描いて等高線図を作つた。測定の誤差は基線から 350m の距離で波高については $\pm 7\text{cm}$ 程度、位置については $\pm 1\text{m}$ 程度である。等高線は 30cm 毎に描いている。No. 1 測点の場合は波の進行方向に殆ど直角に撮影しているから、波の背面で見えない部分は少いが、No. 0 測点では波の進行方向に平行に撮影しているため、波の背面は見えない処が多く、正確な波形の測定は困難であつた。此のため No. 1 測点では連続27枚 (中3枚欠) を図化し、4.17秒毎の波形の変化をかなり詳細に見ることが出来るが、No. 0 測点については連続8枚中 (1枚欠) を図化するに止め、概略を知ることとした。

図-2 波浪等高線図 (等高線間隔 0.3m)

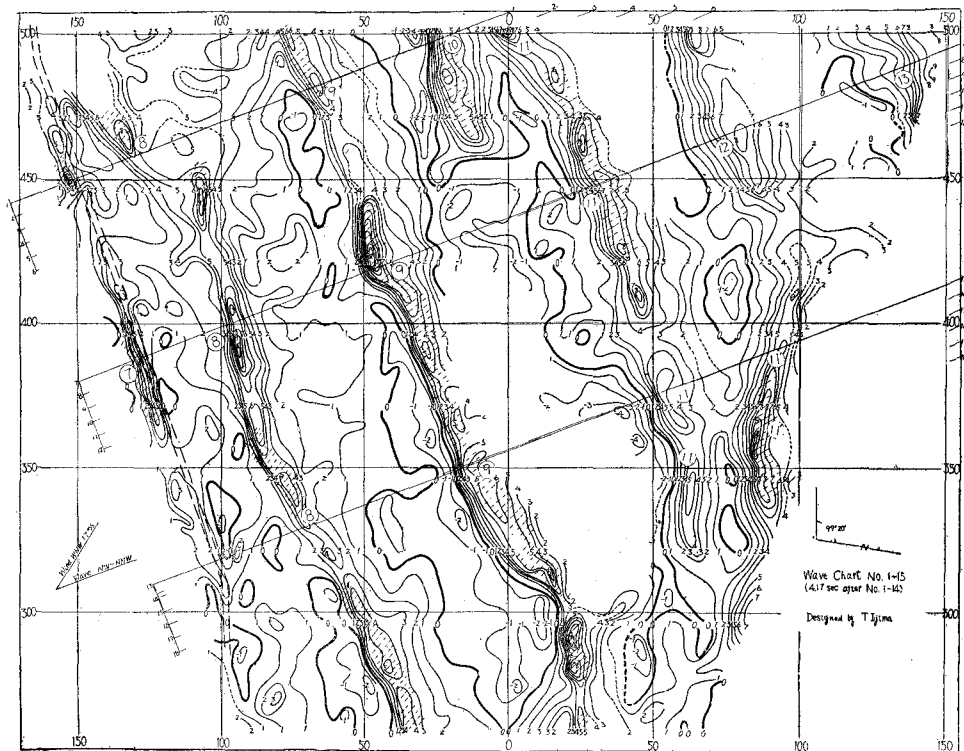


図-3 波浪等高線図(等高線間隔 0.3m)

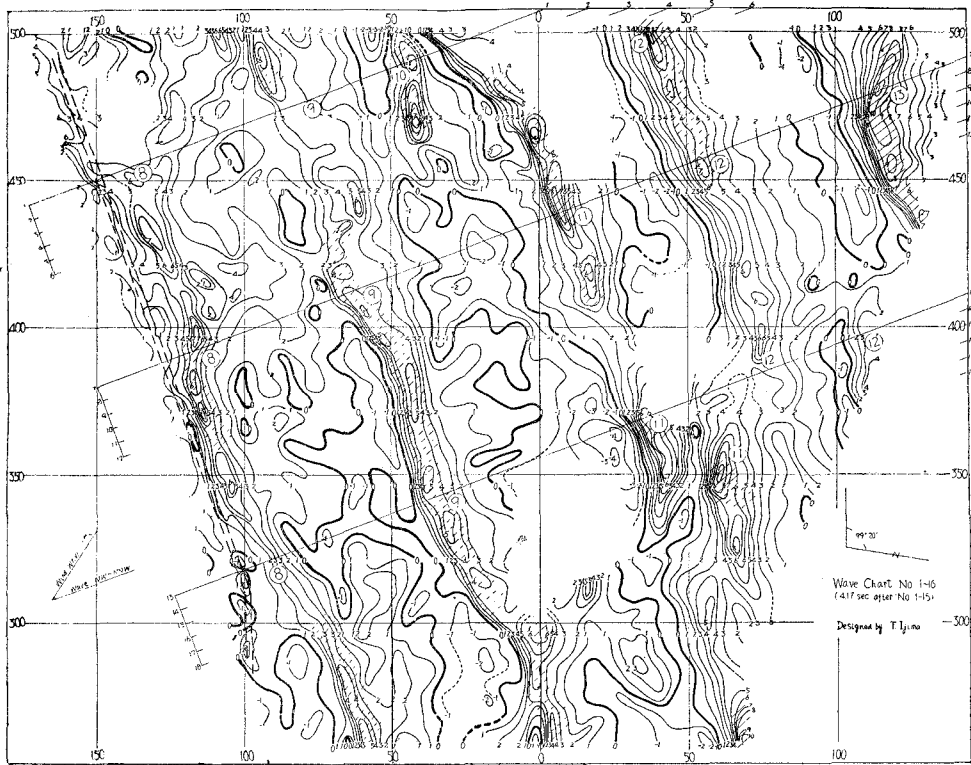


図-3 波浪等高線図(等高線間隔 0.3m)

図-4 波浪等高線図(等高線間隔 0.3m)

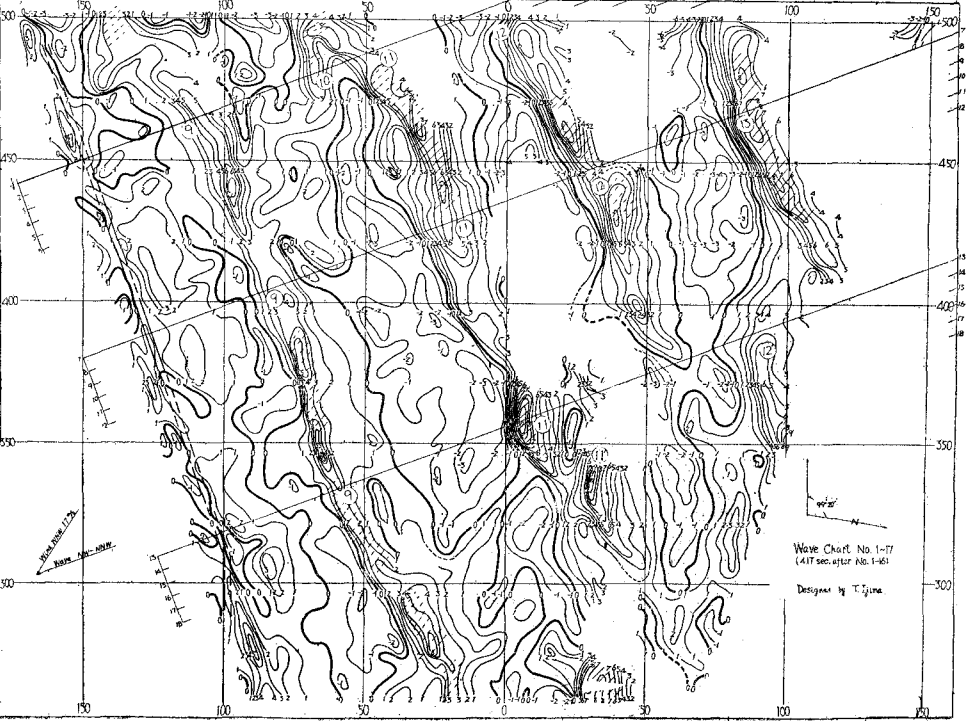


図-5 波浪等高線図 (等高線間隔 0.3m)

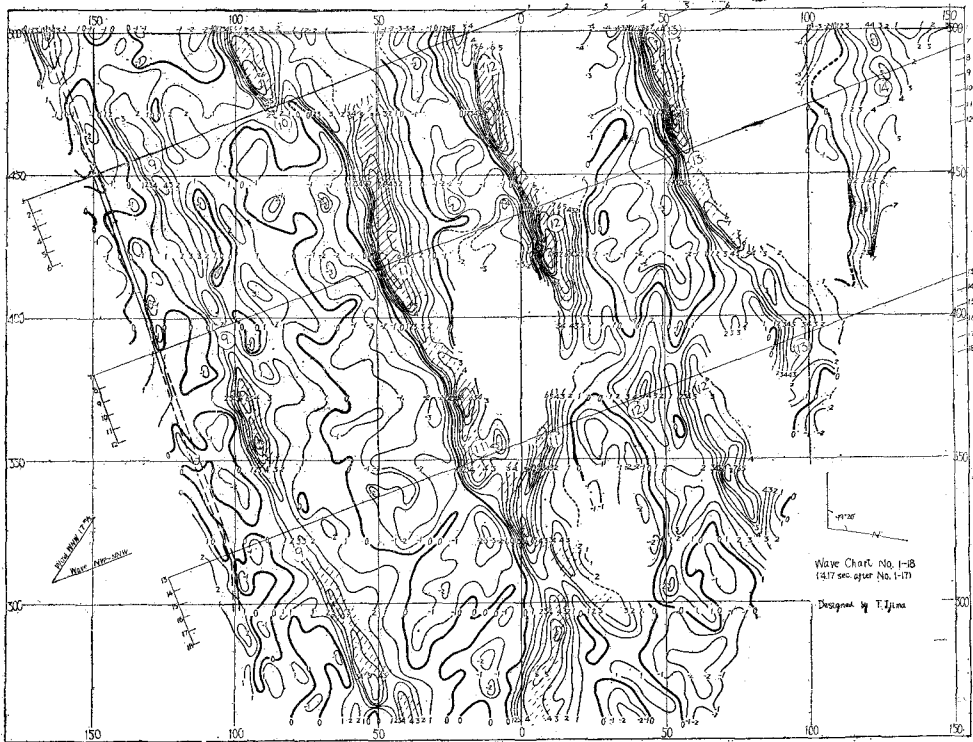


図-2, 3, 4, 5は No. 1 測点での測定の結果, 図化した等高線図, 図-6 は No. 0 測点のものを例示したもので, 各々 4.17 秒間隔の連続した波形である。等高線の 0 は略静水位を示し, 1, 2, 3……は夫々 0.3m 毎の等高線である。+及び-は山及び谷の部分を示して居り, 斜線の実線は特に砕けんとする波, 点線は砕波しつつ進行している波を示す。空白部分は波の背面で図化出来ない部分であり, 左端の点線部分は潜堤位置を示している。図中波頂に番号○, ○等を入れてあるのは整理の都合上つけた波の番号である。写真 1, 2, 3, 4 は夫々図-2, 3, 4, 5, 写真-5 は図-6 を図化するに用いたもので, すべて左側の写真機によって撮影したものである。

斯様にして求められた等高線図から, 波の進行方向に対する波形の断面図を描くことが出来る。図-2 ~ 図-6 には図上に此の断面の位置を示しており, No. 1 測点では, 断面 1, 2, 3, 4, 5, 6; 7, 8, 9, 10, 11, 12 及び 13, 14, 15, 16, 17, 18 は原点を適当に選んで各々の断面の間隔は 5m に取っている。此の原点の位置の汀線からの距離は No. 1 及び No. 0 で夫々約 100m 及び 140m である。波形の測定には相隣る三つの断面図 (1, 2, 3 断面, 4, 5, 6 断面等) から平均断面を作り, それについて波頂の位置, 波高, 波長等を測ることにした。従つて求められた値は幅 15m の海面についての平均値を示すことになる。図-7 は 1 例として No. 1 測点のすべての等高線図から求めた 7, 8, 9 断面の平均断面を示したもので, No. 1-1, ……等は 4.17 秒毎の相次ぐ波形の変化を示している。此の中で No. 1-2 及び 12, No. 1-24 は写真が不明瞭のため測定されていない。図中横縮尺と縦縮尺は 3 : 5 の比で, 波高が 5/3 倍に拡大されている。波頂の位置に波の番号を示して変化の模様を明らかにしており, 又原点からの距離と波頂相互間の距離を記入した。海底断面は測深図 (図-1) の水深に潮位 0.6m を加えたものを示した。図-8 は No. 0 測点の 4, 5, 6 断面を示したものである。

之等の断面図から波形を読みとるときは次の如き規定を設けた。

波長: 番号 (n) の波の波長は (n) と (n-1) 及び (n) と (n+1) の波頂の距離の平均値

波高: 番号 (n) の波の波高は (n) と (n-1) の波頂間の最低点と, (n) の波頂点の垂直距離

水深: (n) の波の波頂点の直下の静水位

以上の手続きによつて各々の波の進行曲線を描くことが出来る。図-9 及び図-10 は夫々図-7 及び図-8 から求められた例を示したもので, 横軸に時間 (秒), 縦軸に距離 (m) を取つて波の位置を示し, 又括弧内に波高を示している。水平軸に平行線を引けば所要の位置での波の周期, 縦軸に平行線を引けば所要の

図-6 波浪算高線図 (等高線 間隔 0.3m)

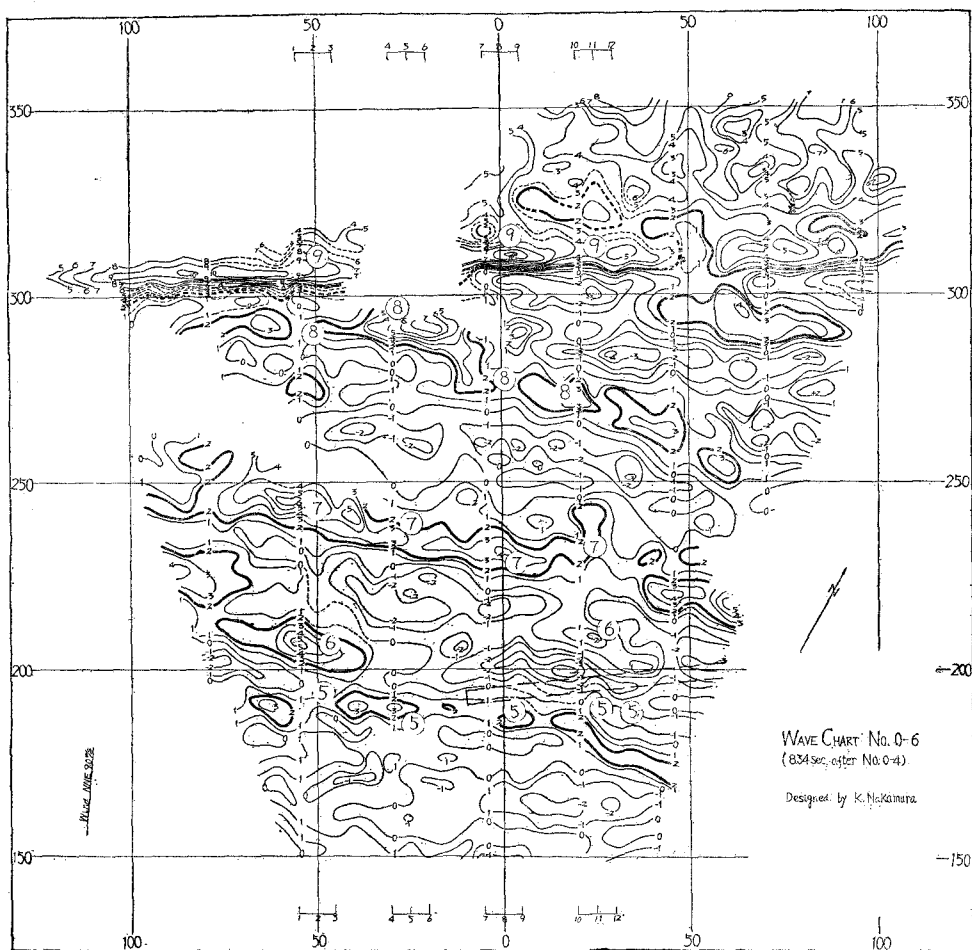


図-8 波形断面図 (No. 0 測点断面 4,5,6)

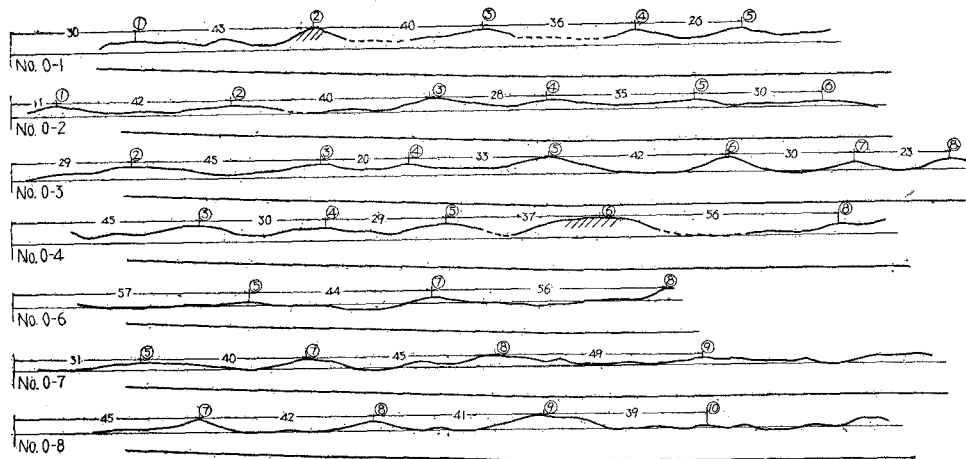


図-7 波形断面図 (No.1 測点, (断面 7.8.9))

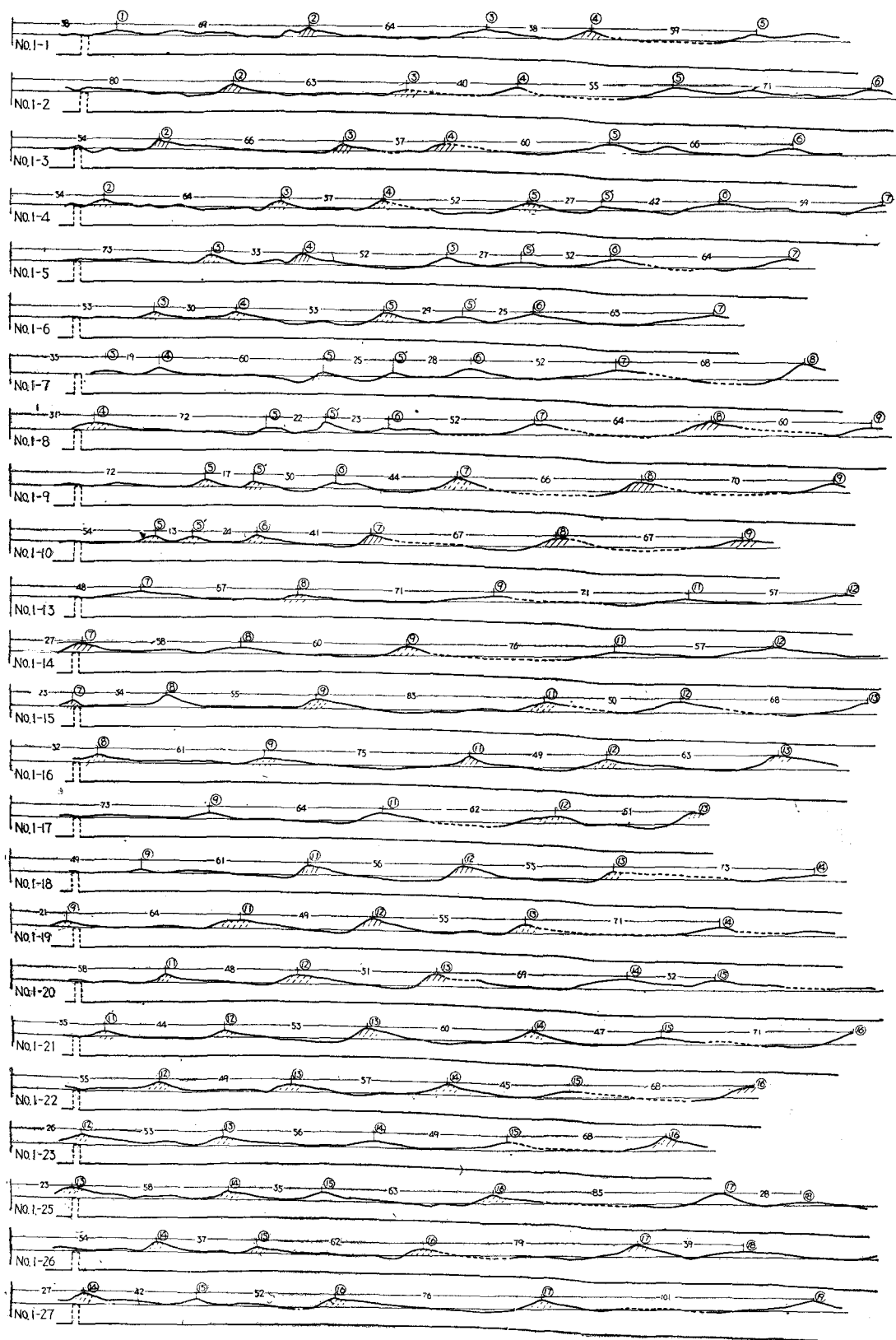
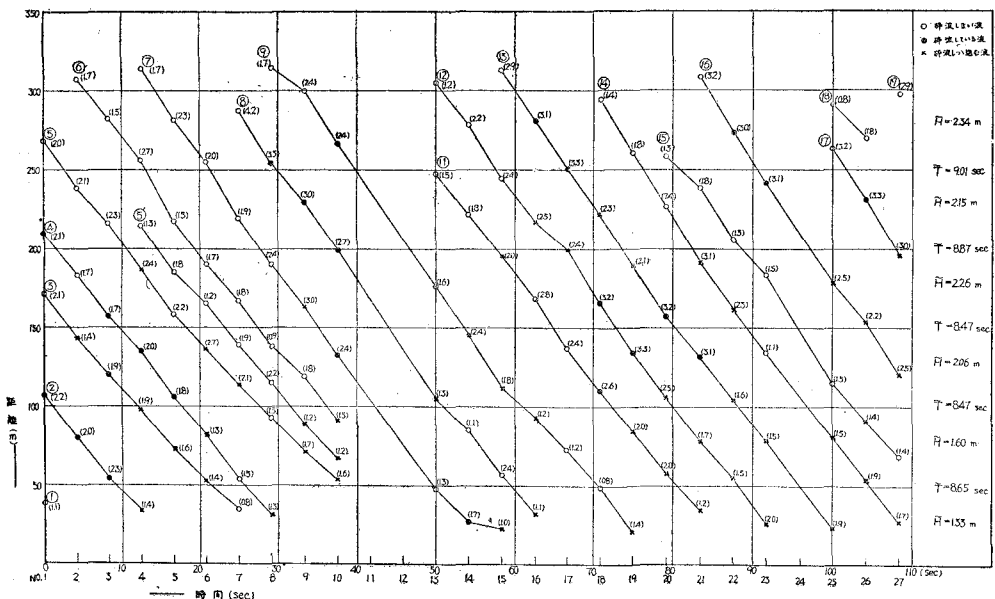


図-9 波の進行曲線



時刻での波長を知ることが出来る。

II. 砕波帯の波の性質

測点 No. 1 の沖波を $S-M-B$ の方法で推算すると波高約 2.4 m, 周期 7.5 秒程度となる。I に述べた観測結果から周期 9.5 秒 (波長 $L_0=142$ m) 沖波波高 2.4 m を仮定すると, 沖波波形勾配は 0.017, 海底勾配は約 1/100 であるから, 速水³⁾, 及び Iversen によると此の波は巻き波として砕波しており, 且潜堤のための反射波によってかなりの部分重複波としての性質をもっていることが想像される。実際に写真でも分る様に巻き波型の砕波が起っており, 最も沖の砕波は水深約 7 m で起っているが, 大部分は 5~6 m で第 1 砕波が起っており, 我々の測定範囲は第 1 砕波線以内に在ることが分る。

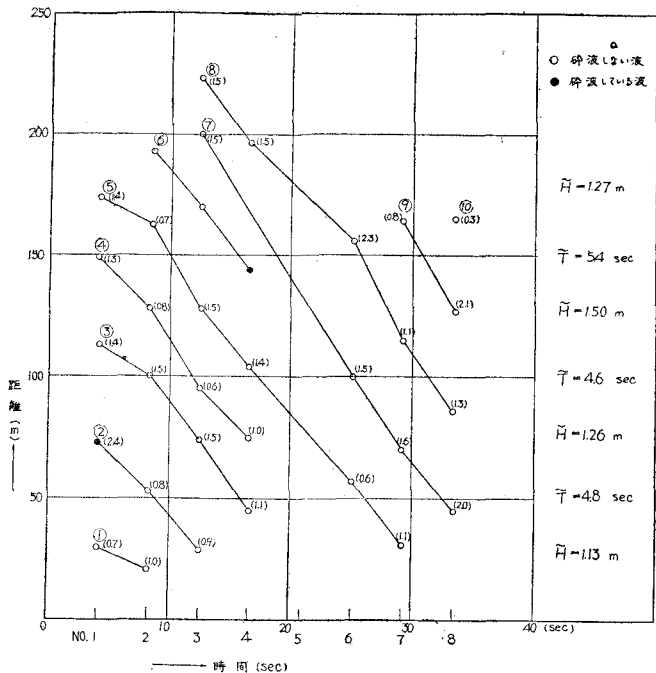
測点 No. 1 の図化した波浪等高線から共通して見られる主な事柄は

(1) 波の進行方向は $NW \sim NN$ W であるが, 図化範囲内では屈折によって海岸線 (潜堤法線) に殆んど平行となる。

(2) 水深 5~6 m (等高線図の右上部分) 附近では波形は稍混乱し, 波向も時刻によつて $20^\circ \sim 30^\circ$ の変動があつて, 沖波の波向に相当の変動があることが窺えるが, 浅海部に入ると殆んど一定の方向を持ち, 又波頂線も長くなる。波頂線の長さは水深 3~4 m で短いものは 30~40 m 程度である。砕けつゝある波の波頂の長さは殆んど 100 m 以下で大部分は 50 m 程度で, 砕けつゝ走る波頂の長さは大体 100 m 程度である。

測点 No. 0 の等高線は波の背面になつて明瞭でない部分が多い。此の時の沖波波高を 1.5 m とすると周期 5~6 秒では波形勾配 0.027~0.037 で, 砕波はむしろ崩れ波型であつて明瞭な砕波帯を見ることは出来ない。波頂線は比較的短く, 等高線図においても図化された範囲内では約 50 m 程度で, 個々の波の変化はかなり

図-10 波の進行曲線



不規則で、No. 1 における如き明確なものでなく波向は潜堤附近 (200 m 位) においても変動が見られる。

等高線図から求めた断面について概観すると

(3) 碎波の前面には砕けによつて小さな波が出来る様で、此の波は進行と共に背後の波に吸収されて行く様に見える。之は砕けによつて起る Cauchy-Poisson の波で波長が短く進行速度がおそいことによると思う。

(4) 明瞭な進行波の間に小さな波が入っていることがあるが、之は碎波帯内で起つた波か、又は潜堤による反射波であるか詳らかでない。1 秒又は 2 秒間隔の撮影を行わねば此の点是不明である。

(5) 碎波は水深 4~5m の海底勾配の局部的に急な部分 (約 1/50) の両端で多く起つていて、それより浅海部の殆ど一定水深の場所では起らない。

1. 周期及び波長

No. 1 及び No. 0 測点での此の測定による周期を調べるために、図-9 及び図-10 の夫々原点から 50 m 毎の距離での平均周期を計算し、図-11 及び図-12 に示した。之によると No. 1 測点では断面の位置により 8~9.5 秒で、同一断面でも位置により 0.2~0.5 秒の差異があることが分るが、平均的に云つて周期は 9.0 秒と考えられる。之は測定時間が短いためのもので更に長時間に亘つて測定すれば、殆ど等しい値を取ることが予想されるが、周期 10 秒程度の波の周期を測るには少くとも 30~50 波位を取る必要があることが分る。図-12 では周期が 4.2~5.5 秒で場所による変動は大きい。尚波の進行曲線と同じ区間について波高の平均値を取つたものを同時に示したが、之によると断面の位置による波高の変動は比較的少く、図-11 では波高は最も沖 270 m で 2.3 m を示し、漸次減少して 1.3 m 位になつており、最も碎波の頻繁に起る 170 m 附近で約 2 m で大体碎波後波高は平均して約 60% 以下に減少することが分る。此事は過去の同様な方法による著者の観測結果とも殆ど一致している⁴⁾。No. 0 測点では波高はかなり小さく 1.0~1.5 m 程度で距離及び断面の位置による波高の変動は余り見られず、此事は波浪等高線図においても見られることで二つの断面では潜堤の存在によつてかなりの波高の相異が予想されるに拘らず、測定の結果では殆んど相異が見られないことは測定時間の短い事もあるが、潜堤による波の反射がかなり小さく、見掛上の波高に影響を与える程のものでないことを示している。

波の波長が進行と共に如何に変るかを見るために、前述の方法で波長を読み取つたものを No. 1 測点の断面 7~12 について求めたものを図-13 に示した。他の断面では等高線図で読取られる波数が少く、変化を見

図-11 波高と周期の分布 (No. 1 測点)

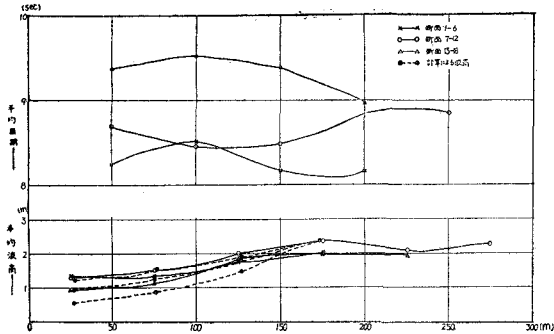


図-11 波高と周期の分布 (No. 1 測点)

図-12 波高と周期の分布 (No. 0 測点)

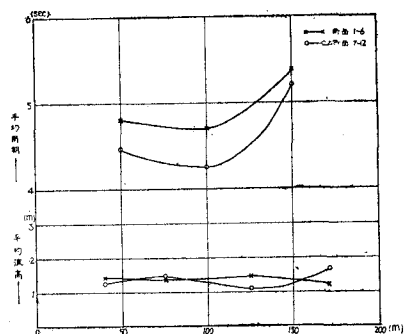
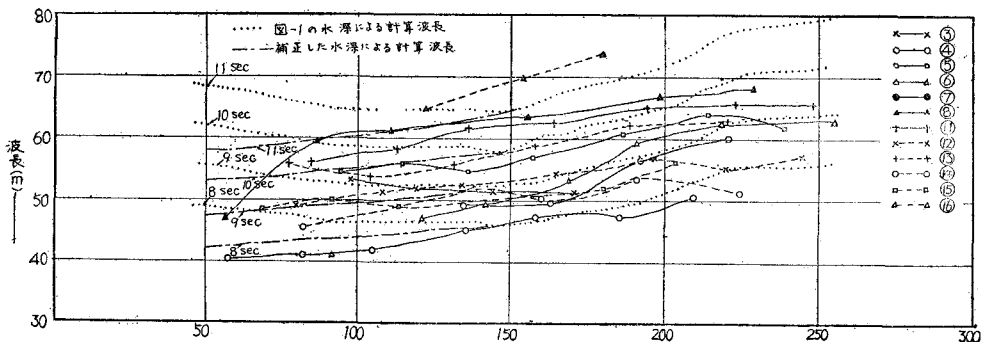


図-12 波高と周期の分布 (No. 0 測点)

図-13 波長の変化 (No. 1 測点 断面 7~12)



るに適しないので省略している。図の記号は波の番号を示している。又点線は周期8～11秒に対する微小振幅波の波長を示したものである。此の図で沖から150m附近迄は波長は大体水深と共に理論値に近い傾向で減少しているが、砕波点附近(150m附近)をすぎると理論値と逆に矢張り減少を続けている。此の附近の海底地形は前述の如く必ずしも実際とは一致していないから、此の現象については明白な解釈は与えられない。

昭和25年7月、12月及び26年4月に行われた新潟港工事事務所の測深図によれば、此の附近の水深2～3mの部分における海底地形の変化はかなり激しく、7月に比べて12月では潜堤前面は0.5～1m程度浅くなっており、4月には又殆んど7月の形に戻っているのが見られる。此の事と図-13を参照すると、測定波長と理論波長の変化の傾向が殆ど近似している150m附近から以内は、水深が図-1の測深図より浅くなっているものと考えの方が妥当と思われる。50mの地点で水深が1m浅くなっているものと考え、150mから50mまで一様に水深が変ると仮定して、各周期に対応する波長を図-13に記入すると鎖線の如くなり、測定値との傾向はよく一致する。従つて此の観測時には殆ど此の修正された水深と、図-1による水深との間の水深をもつていたものと考えて大差ないと思われる。

又此の図で見ると存在する波は周期8～11秒の間にあることが分り、9秒前後のものが最も多く、断面7～12に関する進行曲線からの平均周期は8.5～9.0秒である事と良好な一致を示すもので、砕波帯内の波長は理論値によつて計算して充分正しいと考えて良い。

2. 波速

次に進行する個々の波の速度を理論的速度と比較するため、波の進行曲線を用い横軸に時間、縦軸に距離を取つて、周期9秒及び12秒の理論的微小振幅の波が300mの地点から出発して進む時の軌跡と実測による波の進行軌跡とを描いて比較して見

図-14 波の進行曲線 (No. 11 測点 断面7～9)

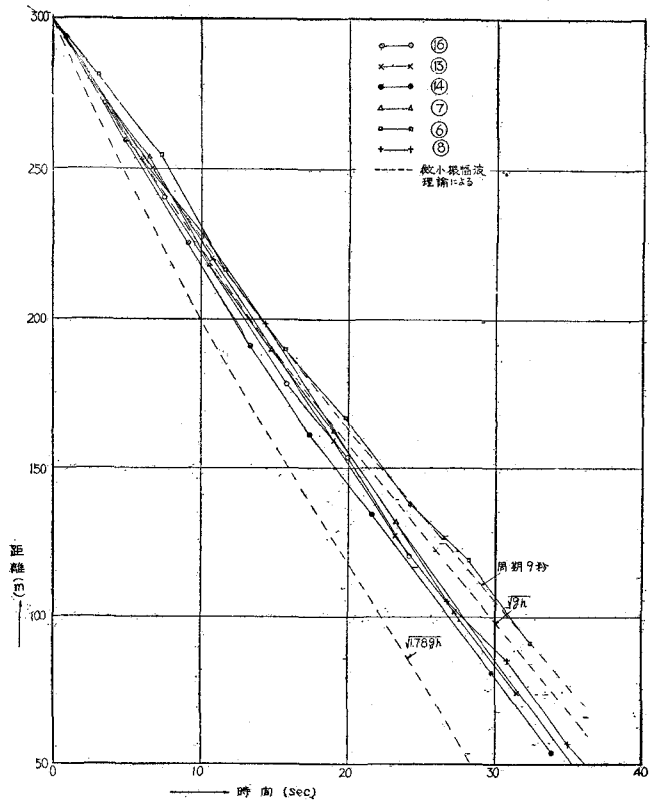
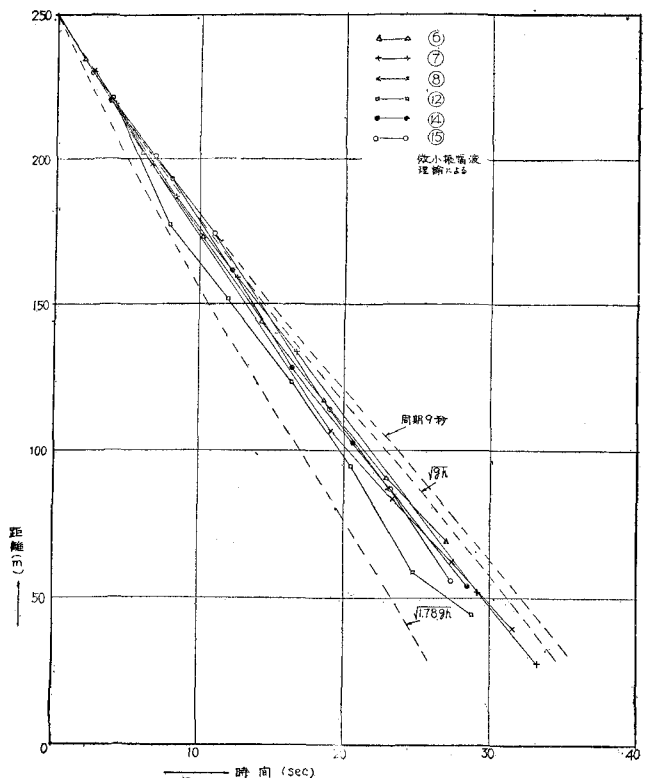


図-15 波の進行曲線 (No. 1 測点 断面16～18)



た。理論値による進行曲線は図-1の測深図に示す水深を用いたが、実際には150m以内ではもつと水深は小さいと考えられるので、此の進行曲線はもつと緩勾配になると思われる。図-14はNo.1測点の断面7, 8, 9について示したもので、之から実際の波速は微小振幅及び長波の速度よりも大きく、砕波限界にある孤立波の速度よりは小さいことが分る。此の傾向は他の断面(例えば図-15の断面16, 17, 18)においては更に明瞭である。此の場合波の進行方向は断面に平行で一定と仮定しているが、実際には波の進行方向は常に多少の変動を伴っているものであるから、波速は場所により常に変動するもので、之を波向を考慮して正確に測るならば上述の傾向は更に明瞭になると思われる。此等の結果を参照すると砕波帯の波の進行速度は、微小振幅波による波速よりも少くとも約10%程度大きな値を示すもので、波速としては長波の波速を用いるのがより実際に近いと考えられる。比較のために波高の小さい場合のNo. 0 測点の断面3, 4, 5での値を

図-16 波の進行曲線 (No. 0 測点断面4~6)

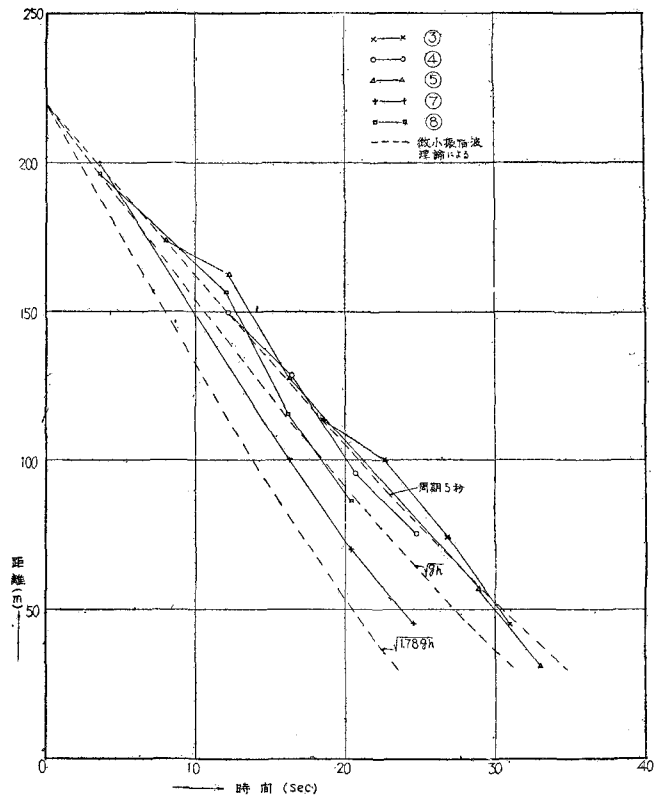


図-17 波高の変化 (No. 1 測点断面7~12)

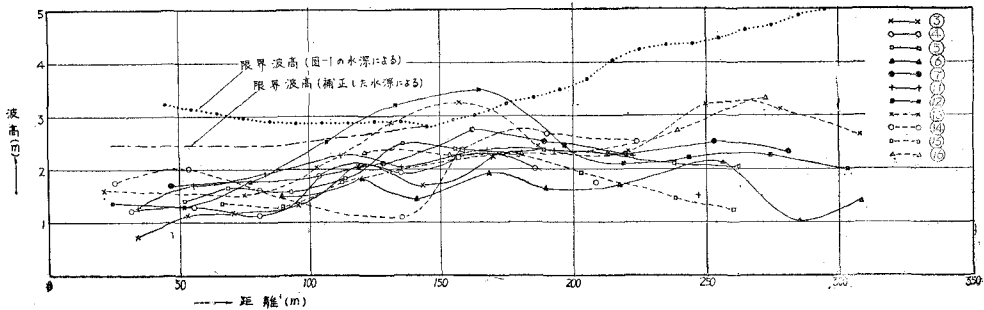


図-18 波高の変化 (No. 1 測点断面1~6)

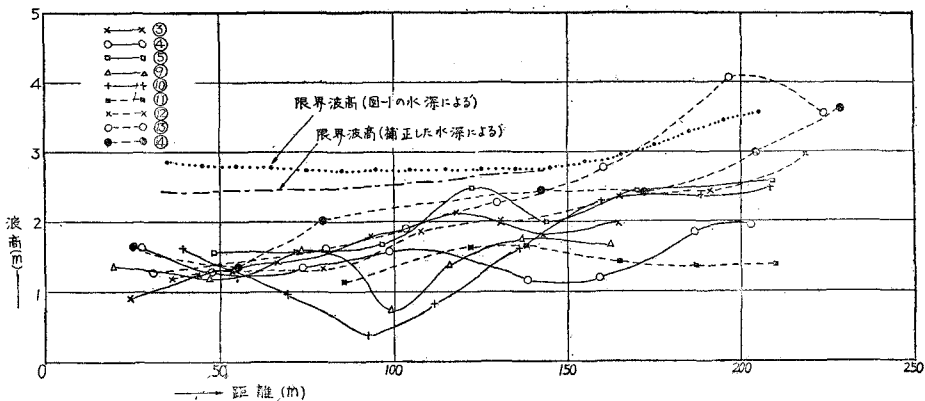
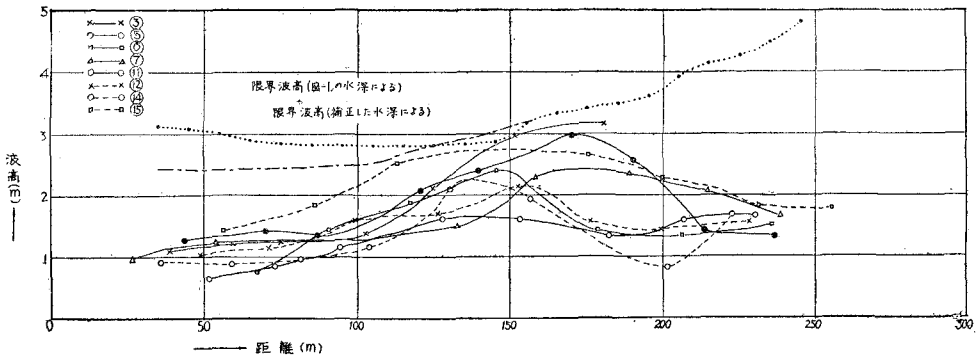


図-19 波高の変化 (No. 1 測点断面 13~18)



示すと図-16の如くで、理論曲線の周囲に変動している様子が分り、此の場合は微小振幅波に近い速度を示しているものと考えられる。

3. 波高

進行曲線に記入された波高によつて波の進行による波高の変化を調べるため、No. 1 測点の断面 7~12 の平均波高 (幅 30m の海面についての平均) についての原点からの距離と波高の関係を示すと、図-17の如くである。波の番号毎に記号を変えている。

此の図で見ると距離 150m 附近に最大波高を示す点があり、之より岸側では波高は殆ど減衰し、約 70m 附近では波高はすべて 1~2m の範囲内に納つてしまう。又 150m より沖側でも波高は稍低くなつており、220m 附近では波高は 1.5~2.5m の範囲内に入つている。即ち、220m 及び 70m 附近を節として、その中間では大きく変動した形を持つている。此の事は最初の砕波点が 250m 附近にあり、第 2 の砕波点 150m 附近にあることと一致して興味ある事柄で、此の傾向は断面 13~18 においても窺える事である。図-18 及び図-19 は夫々断面 1~6 及び 13~18 の平均断面図について同様に図示したものである。図中点線で示したものは図-1 の水深による孤立波としての限界波高、鎖線は 1. で述べた様に水深を補正したものに対する限界波高で、之等の波はすべて相対水深 h/L が 0.1 以下であるから、此の限界は Suquet-Wallet の限界波高⁵⁾と一致する。之等の図から約 150m 附近で波高は殆んど限界波高に等しいが、それ以内では決して此の限界波高に達していない。此の部分では沖波波高が今の場合よりも大きくても、此処に示した以上の波高を示すことはないと考えられる。

此の波高の変化を視ると次の事が共通して分る。

- (i) 限界波高に近い波は 150~170m 附近に最大値をもち、それから一様に減少する。
- (ii) 波高の小さい波は最終的に減少する前に 2 個以上の極大値をもつて、波高は振動的に変化している。
- (iii) 砕波後の波は必ずしも砕波限界の条件でしばられているものではない。図-17 に於て最も典型的な ⑩及び ⑪の波について波形が進行と共に如何に変るかを示そう。図-20 及び図-21 は図-7 に 1 例を示した断面図で、波頂附近の波形を波高 H を尺度として示したものである。即ち波高 $H=1$ として水平距離及び波面の高さを計算したものである。図に記入した距離から図-17 と対応させて見ることが出来る。点線は同じ波高水深比をもつた孤立波の波形である。

図-20 の ⑩の波は砕波以前には孤立波よりも flat な形であるが、No. 1-16 において初めて砕波となり、No. 1-19 まで砕けつゝ波高を増加し、孤立波よりも steep な波形を示し、進行し乍ら波高を減じ、波形は次第に対称な孤立波の形に近づくのが分る。同じ ⑩の波の断面 10~12 についても同じ事が分り、砕波の前面では孤立波よりも、steep で後面で flat な形を取るのが多い。

図-21 の ⑪の波は距離 270m (No. 1-16) で砕け初めており、此の時の形は前面の (No. 1-18) に近い。之が進行と共に波高を減ずるが、更に (No. 1-20) で再び波高を増して 2 度目の砕波を行い以後漸減を示し、その形は図-19 の減衰時に近い。

4. 砕波帯内の波高の減衰

砕波点において砕波した波が進行と共に如何にその波高を減衰して行くかという問題は重要であり、又興味ある問題であるが、現在までの処その変化を適確に示した成果はない。此の場合の波高減衰の割合は砕波の型式、即ち巻き波型であるか、崩れ波型であるかによつて最も大きく左右される様に思われる。常識的には巻き波の場合が最も減衰が甚しいと考えられるが、一度砕波した後は砕波による渦動粘性によつて最も大きく左右され、海底地形によつて一様に水深が浅くなるか、又は一様水深の場所が続くかによつても砕波し

つゝ進行する距離が変わるので、減衰の程度も変わるであろう。

一般に砕波した後に白波を立て乍ら進行する距離は、波の砕け方によつて大体一定して、巻き波型の時が最も大きく2〜3波長の程度で、進行と共に此の白波は消失して、波は flat な形に帰つて行く様である。波高の減衰の原因は此の他に底面での乱れによる摩擦損失や、海底の透水性による摩擦損失などもあるが、砕波帯においては砕けによつて起される水面附近の渦動によるものが最も大きいと考えることが出来、その程度は又 *tatal breaking* に近い巻き波型において最も甚しいと思われる。此処に示した観測例は此の巻き波型に近いので、典型的な波高減衰を示しているものと考えられるので、減衰の主因として渦動粘性を考え、全く分子粘性による摩擦損失と同じ様に取り扱つて見た。此の様な取扱いとは勿論便宜上の形式的なもので、此の場合の渦動は波自体の進行によつて起るもので、予め渦動粘性の存在する媒質内を波が進行するのとは現象自体には根本的な相異がある。

此処では簡単に粘性係数が水平方向にも水深にも拘らず一定とし、又波は進行と共に波長が変らない(水深一定)と仮定した。

波高 $H=2a$ 、波速 c 、波長 L の波が水深 h の海を進行するとき、海水の動粘性係数 ν を、水の密度を ρ とするとき、波形を

$$\eta = a \cos k(ct - x) \dots \dots \dots (1)$$

但し $k = 2\pi/L$

とすると水の内部摩擦によるエネルギー損失は

$$D_1 = 2\nu\rho k^3 \cdot c^2 a^2 \coth kh \dots \dots \dots (2)$$

底面摩擦によるエネルギー損失は

$$D_2 = \rho k^2 c^2 a^2 \sqrt{\frac{k\nu}{2}} \frac{1}{2 \sinh^2(kh)} \dots \dots \dots (3)$$

又波のもつ全エネルギーは

$$E = \frac{1}{2} \rho a^2 c^2 \cdot k \coth kh \dots \dots \dots (4)$$

従つて水深一定で波長の変化がないと仮定すると、波のエネルギーの時間的変化は

$$\rho c^2 \cdot k a \frac{da}{dt} \cdot \coth(kh) = -2\nu\rho k^3 c^2 a^2 \times \coth(kh) - \rho k^2 c^2 a^2 \frac{\sqrt{1/2 k\nu}}{2 \sinh^2(kh)}$$

故に

$$\frac{da}{dt} = - \left(2\nu k^2 + k \frac{\sqrt{1/2 k\nu}}{\sinh 2kh} \right) a \dots \dots \dots (5)$$

砕波帯内でのエネルギー損失は砕けによる海水の渦動粘性係数による損失が圧倒的に大きなものと考えられるから、(5)右の辺の第2項を第1項に比して無視することにすれば、

$$\frac{da}{dt} = -2\nu k^2 a \dots \dots \dots (6)$$

図-20 波形の変化 (No. 1 測点 断面 7~9 (2))

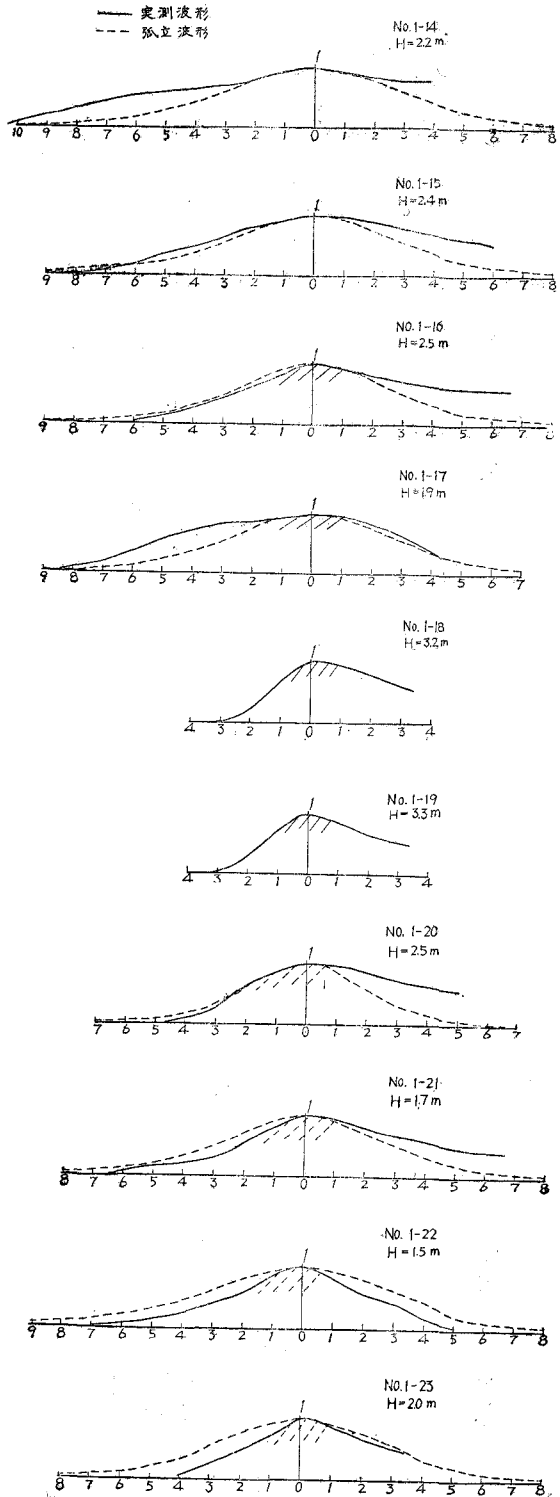
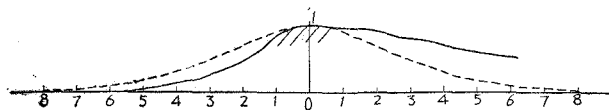


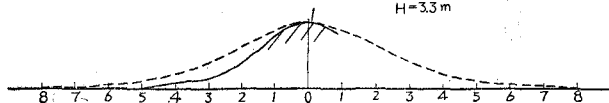
図-21 波形の変化 (No. 1 測点 断面 7~9 ③)

—— 実測波形
 - - - 孤立波形

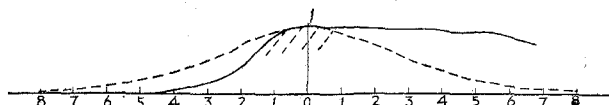
No. 1-16
 $H=31\text{ m}$



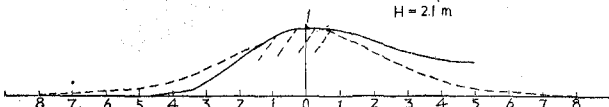
No. 1-17
 $H=3.3\text{ m}$



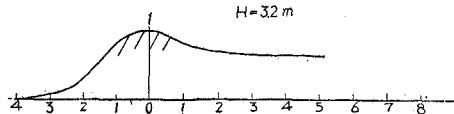
No. 1-18
 $H=2.3\text{ m}$



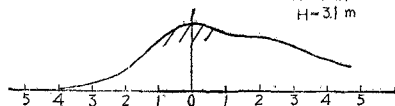
No. 1-19
 $H=2.1\text{ m}$



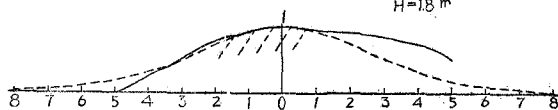
No. 1-20
 $H=3.2\text{ m}$



No. 1-21
 $H=3.1\text{ m}$



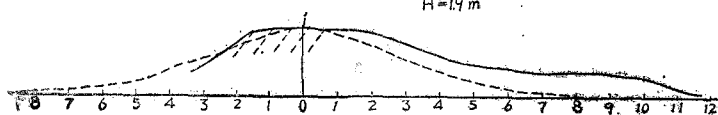
No. 1-22
 $H=1.8\text{ m}$



No. 1-23
 $H=2.1\text{ m}$



No. 1-25
 $H=1.9\text{ m}$



$t=0$ における波高を H_0 とすると (6) から

$$\frac{H}{H_0} = e^{-2\nu k^2 t} = e^{-\frac{8\pi^2\nu}{L^2}t} \dots\dots\dots (7)$$

$t=0$ から $t=t$ までに波の進行する距離を x をとすれば, $x=ct$, 従つて $x=0$ で H_0 の波高をもつ波の $x=x$ における波高 H は

$$\frac{H}{H_0} = e^{-\frac{8\pi^2\nu x}{cL^2}} \dots\dots\dots (8)$$

(2) に述べた処に従つて $c=\sqrt{gh}$ とすれば

$$\frac{H}{H_0} = e^{-\frac{8\pi^2\nu}{\sqrt{g}} \cdot \frac{1}{\sqrt{h}} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{x}{L}} \dots\dots\dots (9)$$

今砕波帯における波高の減衰が近似的に上式であらわされるものとすれば, 砕波点における波高を H_b に取り, 砕波点からの距離を x として $\frac{x}{\sqrt{h_b} \cdot L^2 b}$ と $\log H/H_b$ の関係を求めれば, それらは殆直線的な関係にある筈である。

図-16~18で距離 150~200m の範囲内にある波高の最高値を H_b とし, そこでの波長 L_b を図-13から求め, $x/L^2 b \sqrt{h_b}$ に対する $\log H/H_b$ を求めて断面13~18を例示すると図-22に示す如くである。すべての断面についての結果を示すと図-23の如くで, 図から点の分散はかなり大きいが, 大体に於て直線的な関係が存在するものと考えられ, その平均値は①の直線であらわされ, ②及び③はその上限及び下限を示すものと考えられる。之等の直線に対応する (9) 式の ν_b を計算すると夫々

$$\begin{aligned} \nu_{b1} &= 1.705, & \nu_{b2} &= 0.992, & \nu_{b3} &= 2.58 & (\text{cm}^2/\text{sec}) \\ &= 1705 & & = 9920 & & = 25800 & (\text{m}^2/\text{sec}) \end{aligned}$$

即ち此処に仮定した砕波による渦動粘性係数は 10000~20000(cm^2/sec) の程度の値を取るものと考えられ, 之等は海水の分子粘性係数の 10^6 倍の程度, 海流の渦動粘性係数の10~100倍の程度である。之等の値を用いて (9) 式は次の如く表わされる。

図-22 波高の減衰(No. 1 測面)

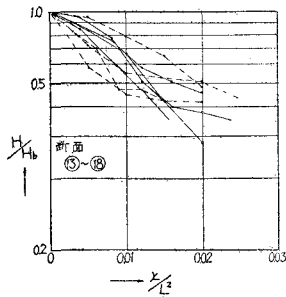


図-23 波高の減衰 (No. 1 測点)

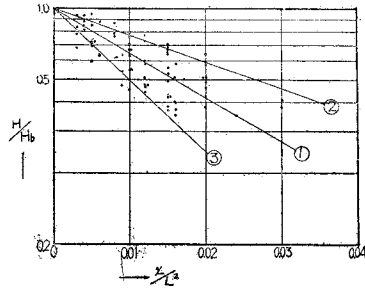
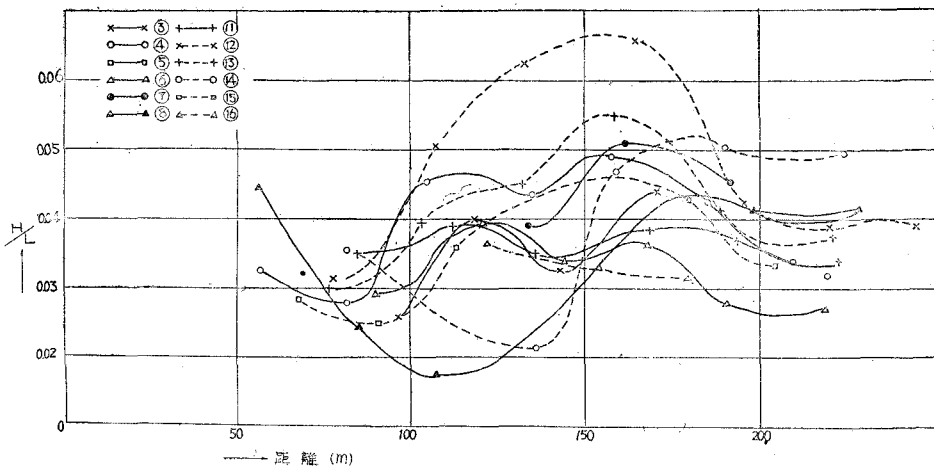


図-24 波形勾配の変化 (No. 1 測点 断面7~12)



$$\frac{H}{H_b} = e^{-\alpha \cdot \frac{x}{\sqrt{h_b} \cdot L_b^2}} \dots \dots (10)$$

茲で $\alpha=25 \sim 65$ 平均 ($43 \text{ m}^2/\text{sec}$) である。但し此の場合 $x/L_b \leq 3$ の範囲でのみ使用出来るものである。

此処に示した α の値は砕波時の波高に関係している様で、大きな波程減衰の割合は大きい様に思われる。実際図-18と同様にして波の進行に伴う steepness の変化を求めて図示すると図-24の如くで、砕波点附近 (150~170m) で大きな steepness の変動が見られるに拘らず、2~3波長進行した70~80m 近傍では steepness 殆んど一定値 $0.025 \sim 0.035$ を示す様になる。之は波長の減少率が波高の減衰率程著しくないので、大なる波高を持つ波がより急速に減衰することによるものである。

$x/L_b \leq 3$ の範囲は図-16からも分る様に、波高の減衰は2~3波長を以て殆んど終り、それ以後は分子粘性及び底面摩擦、又は percolation 次第に卓越して行く筈のもので、従つて実用上はそれ以後波高は殆んど一定と見做される。之は砕波による効果が渦動拡散の影響が2~3波長以下しか保存されていないことを示すものと考えて良く、又その影響は距離 x と共に減少して行く筈のものである。従つて α は H_b と共に又 x にも depend すべき数値である。又根本的には砕波の型式に大きく左右されるものである。前述した様に此の場合は巻き波の典型的な場合と考えられ、 α の値は他の場合よりも大きい筈である。然し日本海岸では代表的な波においては必ず巻き波となる筈であるから、此の α は実際には大きな誤りを生じないと思われる。

試みに (10) 式を用いて図-11に示された平均波高図に於て、距離 175 m での波高 2.3 m として、125 m、75 m 及び 25 m における波高を計算して見ると、黒丸で示した如き値となる。中央の値は $\alpha=43$ 、上及び下の値は夫々 $\alpha=65$ 及び 25 を用いて計算したものである。 $\alpha=65$ の場合を除いてはその一致は良好なものと考えられる。

(10) 式を、 $\alpha=43$ として横軸に x/L_b 、縦軸に H/H_b を取り、水深 $k=1 \sim 8 \text{ m}$ について示すと図-25の如くである。点線で示した5秒~12秒の線は $x \leq 3L_b$ の限界を示したもので、各周期に対して此の図表が用いられる範囲は示された周期の左側に限られる事を示すものである。

以上の波高減衰の割合は最終砕波を行つた後の減衰に当てはまるものであるが、例えば図-18に示した③の波の場合は 270 m 附近で第一砕波を行い、150 m 附近までに再び波高を増加して第二砕波を行つている。

図-25 H/H_b と x/L_b^2 との関係

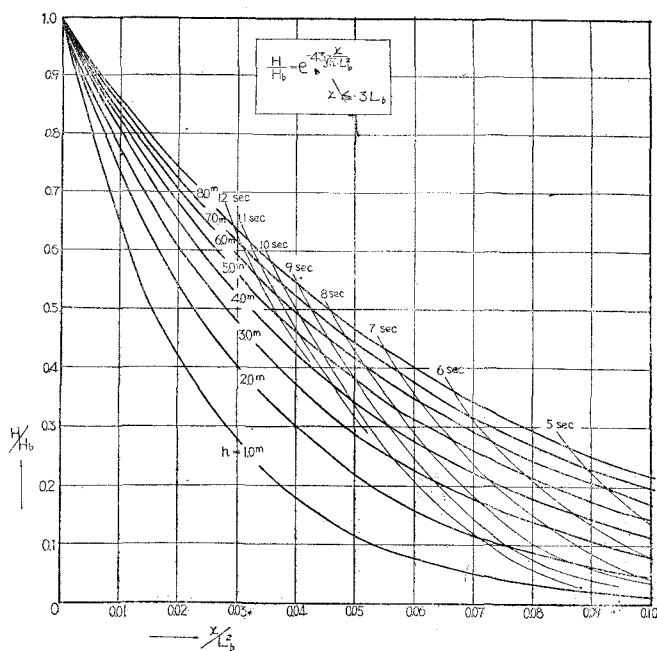
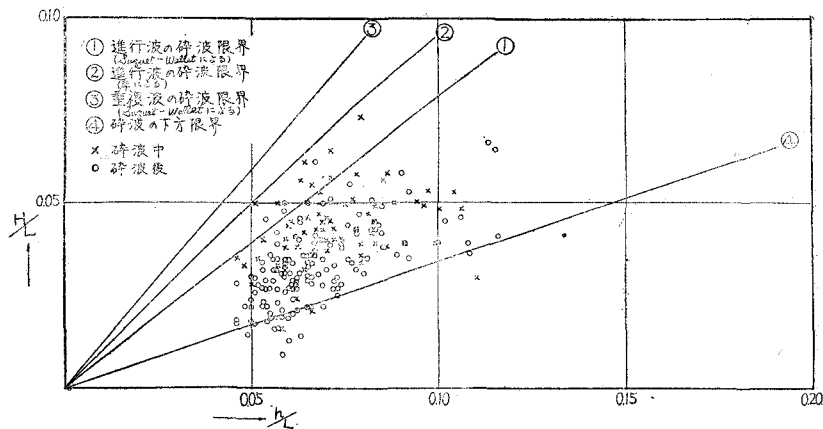


図-26 砕波の波形勾配と相対水深



此の再度の砕波の後の波高減衰率は近似していることから考えて、此の關係は常に成立するものと予想される。即ち第1砕波の後、進行と共に波高が減衰しても浅海部に進むと共に砕波後の波高が、限界水深に近づくときは再び此處で砕波を行い、前と同様の割合で波高が減少して行くものであろう。150 m 以内で砕波が新に始まらないのは水深が浅くなることがないから、進行により減衰した波高は限界水深に近づくことがないからである。又(10)式は巻き波型で最も減衰の著しい場合の砕波に対してあてはまるものと考えられ、例えば No. 0 の測定による崩れ波においては、減衰の割合は之よりも小さくなるものと考えられる。

5. 砕波限界

砕波帯内での砕波と、砕け乍ら進行している波の波形の限界を見るため、No. 1 測点での3断面づつの平均波形から波形勾配 H/L と相対水深 h/L とを求めて図示すると、図-26に示す如くである。此の場合 150 m 以内の水深は1.に述べた様に補正した水深を用いているから、砕波後の波では h/L が多少小さくなっている傾向がある。此處で×及び○を以て、砕けつゝある波と砕け乍ら進行する波を区別している。①の線は Suquet-Wallet による進行波の砕波限界で、 $h/L < 0.1$ では孤立波の砕波限界と一致する。②は岸によつて求められた砕波限界である。③此の図を見ると砕け乍ら進行する波は砕波よりも一般に低い波形勾配を示しており、又何れも①の線よりも上廻る値を示す時もあり、②の線を越えるものはない。従つて此の場合は③の線を以て砕波限界とする事が妥当で、孤立波の限界は多少低目である。但し実際には部分重複波が存在しているものと考えられるから、②の線を以て進行波の砕波限界と定めることは疑問がある。Suquet-Wallet の完全重複波の砕波限界は③の線であり、②は①と③の間にある。又④は図から見られる殆ど砕波の下方限界と考えられる様で、此の線をこえる波形勾配をもつ波は砕波として存在し得る可能性があり、又之より低い波形勾配の波は砕波としての性質を充分に保持しないものと考えられよう。従つて実際には②及び④の線の間に来る波は、砕波としての性質を示すことが可能なものと思われる。此の下方限界線は筆者の防波堤前面での波の観測から求められたものと殆ど等しい。

6. 波頂点、波底点及び波高中分面

波の進行に伴う波頂の最高点と波底の最低点とが、如何に変わるかを見るために1例として、No. 1 測点の断面7~12について之を示したものが図-27である。之によると 30m, 170m 及び 250m 附近が最も高く、之は潜堤前面及び砕波点に相当している。その中間 80m 及び 190m 附近で最も変動が少く、砕波後の波の進行している部分に当る。270m 附近の最高点は 2.7m で、30m 附近の最高点は 2.4m であるから、波頂点の低下は余り著しくない。之は後述する如く波高の減少にも拘らず波高中分面が 30m 附近でかなり上昇するためである。波底点の変化を見ると、変動量は波頂点に比べて余り著しくないが、傾向として岸近くになると共に上昇を示し、特に 70m 附近から以内が相当に著しい。⑨及び⑩の波の場合で 250m 附近でから 50m 附近まで約 1m の上昇を示している。此の二つの波は前述した様に典型的な砕波であつて、之を支配的な波

図-27 波頂点と海底点との変化

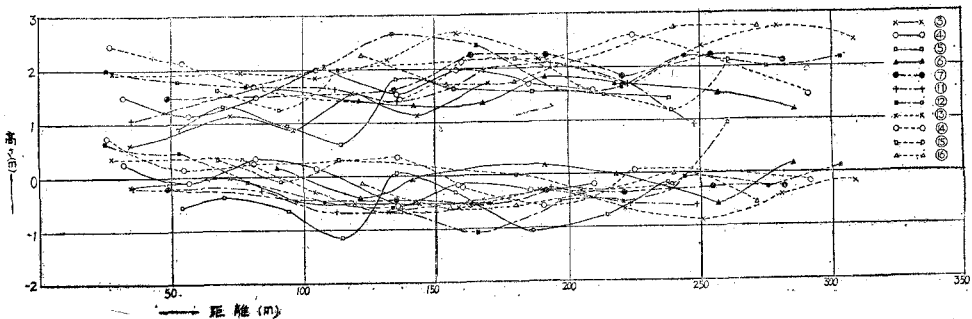
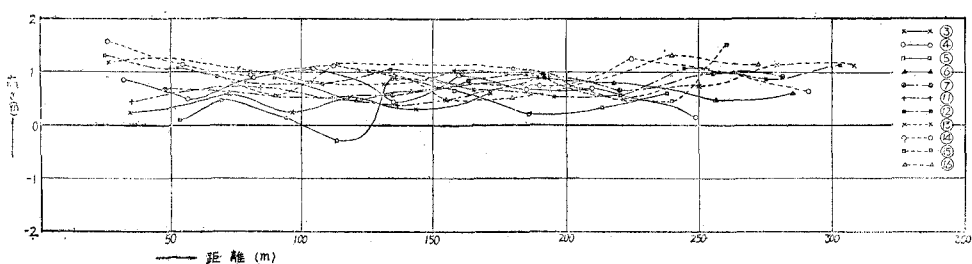


図-28 波高中分点の変化 (No. 1 測点 断面7~12)



と考えると、波底面の上昇勾配は約1/200程度と考えられる。

波高中分面は図-27 から求められるが、之を示したものが図-28 である。平均的には殆んど勾配が見られないが、上述の②及び③の波については 200m から 300m までに約 50cm の上昇が見られ、勾配約1/400程度となつている。従つて此の様な卓越波が連続して襲来する場合は砕波帯内においては連続的に1/500~1/1000程度の水面勾配を生ずる可能性は極めて大きい。

III. 結 論

以上述べた処を要約すると

- (1) 約2分間の連続実体写真による平均波高及び周期は場所によつて相当の相異を生じているが、砕波点附近の値は浮標による目測測定値とよく一致しており、実用上大差ないものと考えられる。
- (2) 新潟海岸における潜堤による反射波は、前面の波高に対しては大きな影響を与えない様に思われる。
- (3) No. 0 測点において見る様に、短周期の波の場合は場所による周期の変動が大きく、且目測測定値とは非常に異なる。
- (4) 砕波帯内の砕波の波頂線の長さは 50~100m の程度である。
- (5) 砕波の最も頻繁に起るのは、底面勾配の大きく変る線であり、之を通過すると汀線までの間で、再び砕波を行うことは稀である。
- (6) 砕波帯内の波長の水深による変化は、理論値と同じ傾向をもっているものと考えられる。
- (7) 砕波帯内の波速の水深による変化は微小振幅波の理論より約10%程度大きく、長波の波速よりも稍大きい。
- (8) 砕波帯内では波高は限界波高 (Suquet-Wallet) に達する事は稀である。砕波線においては此の限界波高に達し、又は之を越えることもある。此の場合の限界波高は岸の与えた砕波限界をこえない。
- (9) 砕波後の波高の減衰は近似的に次式で表わされる。

$$\frac{H}{H_b} = e^{-\alpha \frac{x}{\sqrt{h_b} \cdot L^2}} \quad \alpha \approx 43 \quad x \leq 3L$$

砕波による渦動粘性係数は 10000~20000 (cm²/sec) 程度と考えられる。此の式は巻き波型で碎ける日本海岸の波に対しては、殆一般的に大差ないものと予想される。

- (10) 此の海岸で支配的な波が来る場合砕波帯内での波頂点の低下は著しくなく、実用上は低下なしと云える程度である。波底点の上昇は約 1/200 程度と思われる。
- (11) 此の場合波高中分面の上昇は1/500~1/1000程度である。

以上の結果は平均風速 20m/sec 以上の強風下における砕波帯内の波の性質を述べたものであり、汀線附近に潜堤があるため典型的な傾斜海岸での砕波帯とは云えないにしても、実用上は殆んど日本海の傾斜海岸について、当てはめて大差ないものゝ様に思われる。

砕波帯内の波の変形については、その性質上連続実体写真法による他、正確な測定は不可能であるが、此の方法を用いるとしても図化作業は極めて繁雑で、長時間の労力を必要とする。此処に求められた結果は周期 9~10秒の波についての結果にすぎないので、筆者は更に短周期及び長周期の砕波について、太平洋岸での測定を実施中である。

此の観測は運輸省新潟港工事々務所長高橋淳二氏の熱心な御援助によつて行われたものである。此処に深く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 井島, 高橋, 中村: 実体写真法による波浪の観測 運輸技術研究所報告第5巻第4号昭和30年。
- 2) 井島武士: 沿岸波浪の観測及び本州沿岸の波の性質に関する研究。昭和31年3月(未刊)。
- 3) 速水頌一郎: 砕波の機構 (I) 及 (II)。海岸工学講演集 (1954~1955)
- 4) 井島武士: 新潟海岸の欠浪について。新潟県海岸対策委員会報告書。昭和26年。
- 5) F. Suquet and A. Wallet: Basic Experimental Wave Research. Proc. Minnesota International Hydraulics Convention, Sept. 1953.
- 6) 岸力: 海岸の波浪について。海岸工学講演集 1955 (7)(2) に同じ