

津波造波装置について

岩垣 雄一*・土屋 義人**・中村 重久***

1. 緒 言

津波による災害の防止対策は、わが国において近年とくに重要視されるようになってきた。とくに、日本列島は環太平洋地震帯の上に位置しているの、海底地震による津波災害の記録は枚挙のいとまがないほどである¹⁾。このような津波による海岸災害は数多くの問題を含んでいるので、理工学的見地から種々検討されなくてはならない。津波研究のうち、海岸災害あるいは海岸工学に関連した問題は、津波の発生および伝播の機構と海浜や港湾における津波の挙動である。この津波の挙動を研究する場合には、通常現地海岸における津波の記録による波としての解析、地震による津波の発生と伝播の解析、海岸付近の津波として近似させた規則波の解析といった方法が考えられる。ところが、津波については現在なお不明な点が多いので、このような方法による検討のみでは十分とはいえない。津波研究の一手法として、最近模型実験によって解明しようとする試みが米国やわが国においてなされるようになった。このような実験のためには、従来波浪の実験に用いられてきた短周期の規則波に対する造波装置では不適當である。津波模型そのものが実物と力学的に相似であることが要求されると同時に、模型の規模は実験計測の精度からみても適當でなくてはならない。したがって、この模型実験に必要な津波を発生させる造波装置は、上述のような要素を考慮して設計されなくてはならない。

津波のような長周期波を発生させる装置にも、従来その目的に応じて各種の形式のものが考案されてきた²⁾。とくに従来の造波装置は規則波を発生させることにおいて、すぐれた機能をもっているものが多い。

これまで実施された津波に関する模型実験では、1962年の岩崎および三浦³⁾による気仙沼湾に関するものが最初と考えられる。これはフラッター式造波装置を用いて、主として津波の第1波に着目して研究が行なわれている。東北大学では、さらに津波の実験的研究を推進する努力がなされてきたが⁴⁾、これは電気油圧系自動制御により、実験水槽で給排水することによって津波を発生

させる方法である。1966年にPalmerおよびFunasakiはHawaiiのHilo港の津波について、とくにその屈折と反射に対して気圧式造波装置を用いて模型実験を行なった⁵⁾。一方、同様な目的に対して著者のひとり中村によって、水圧式造波装置も試作され、その特性も検討されている⁶⁾。

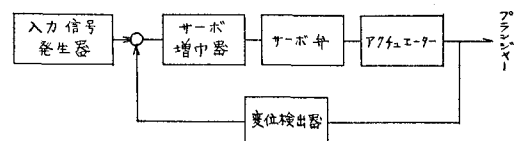
著者らは津波実験用の造波装置として、電気油圧カム制御系を用いたプランジャー式造波装置を試作し、その特性と津波の再現性について検討した結果、模型実験に十分適用できることがわかったので、その概要を述べてい。

2. 造波装置の機能

電気油圧カム制御系を用いたプランジャー式造波装置は、つぎのような制御系によってプランジャーを駆動する。すなわち、図-1のように、カムを入力信号発生器として、変位を電気量に変換し、サーボ増幅器を通してサーボ弁に導き、サーボ弁に与えられた入力信号は電気量から油圧に変換され、アクチュエーターを作動させることになる。アクチュエーターの変位はプランジャーに伝達され、模型水槽内に津波を発生させると同時に、制御系ループを構成する変位検出器を通り、カムで与えられる入力としての変位とプランジャーの変位との振幅および位相が制御される。したがって、カムの変位を任意に与えることによって、振幅は任意に変えられ、カムの回転角速度を任意に調整することによって、周期は任意に与えられる。この造波装置によれば、規則的周期波をつくりだせるだけでなく、任意の津波波形も発生させることができる。

この造波装置のプランジャーは図-2のように設置されている。すなわち、プランジャーは7m×3m×0.5mの直方体で、鉄製のものである。模型水槽外に固定された鉄製アームに、前述のアクチュエーターが取り付けら

図-1 サーボ系ブロック線図



* 正会員 工博 京都大学教授 工学部

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

*** 正会員 理修 京都大学助手 防災研究所

図-2 プランジャー側面図

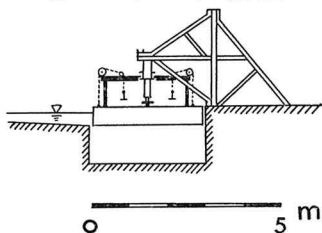


写真-1 造波装置

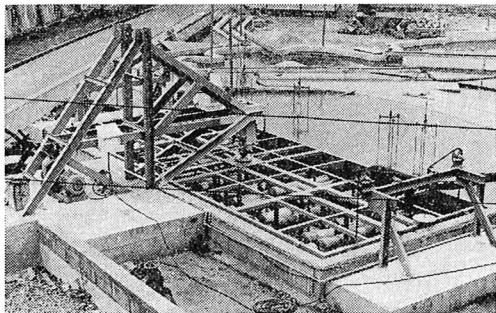
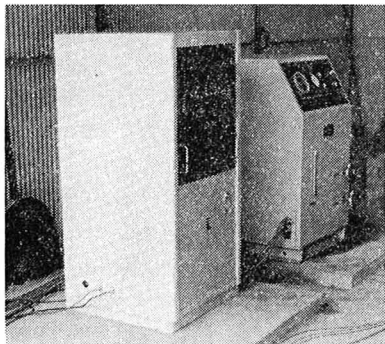


写真-2 制御器および油圧源



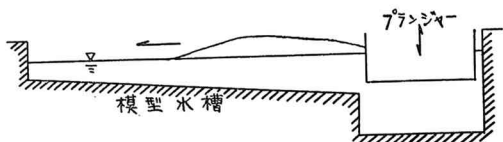
れ、アクチュエーターの先端はユニバーサル・ジョイントによりプランジャーに接続している。プランジャーはアクチュエーターによって駆動され、最大 ± 100 mm の範囲の変位を与えることができる。入力信号発生器としてのカムに同一のものをを用いても、カムの回転角速度を変えると別の波形が得られることになる。カムの回転周期は 30 min から 3 min の間で連続的に変えることができる。

造波装置のうち、アクチュエーターとプランジャーは模型水槽の一端に写真-1 のように配置され、アクチュエーターは油圧管を通して動力室内の電気油圧制御器(写真-2)により自動制御される。

3. 津波の発生方法

図-3 に示すように模型水槽の一端でプランジャーを駆動して波を発生させるとき、その波の特性は一般に理論的に知ることができる。ところで、津波のような場合にはその波長はきわめて長く、模型水槽の水平尺度と同

図-3 模型津波発生説明図



じ程度あるいはその数倍におよぶ。このような実験条件からみると、模型水槽の側壁における波の反射や水深変化部における波の屈折の問題などを考慮しなくてはならない。模型のひずみを考えた場合には、水深変化部において水底勾配は実物とは異なったものとなるので、一般に反射および屈折の問題についての十分な検討が必要になる。模型水槽の奥行きが波長の $1/2$ の場合には、プランジャーの駆動により発生した波の第1波後半以降においては、発生波と反射波との重複がみられるものと考えられる。したがって、数波以上にわたる津波の模型波を対象として実験を行なう必要があるときには、上述のようにして生じた重複波の波形が所要の実験波形に対応しなくてはならない。このような所要の長周期波の波形を数波にわたって発生させるためには、模型水槽の境界条件を考慮にいれてプランジャーの駆動を決定しなくてはならない。このような条件下におけるプランジャーの駆動には、つぎのような検討を行なうのが適当であろうと考えられる。

周期の長い波を対象とすることにし、プランジャー付近の水深から考えて、実験条件に対して浅水波の問題として与えられたとする。波としてのレスポンスも当然考えられるけれども、ここではまず簡単な理論的モデルについて検討する。いま、プランジャーの平面積を R 、模型水槽のうちプランジャー前面の面積 S なる水域が鉛直断面 A を境として、模型水槽の残りの水域と接しているとする。プランジャーが dt 時間に dh だけ変位したとき、面積 S の水域の水位が $d\zeta$ だけ変化し、鉛直断面 A を通して S の水域から出ていく流量を Q とすると、プランジャーと S の水域とによって構成される系について、つぎのような関係が与えられることになる。すなわち、

$$Rdh = Sd\zeta + Qdt \dots \dots \dots (1)$$

断面 A について、平均流速 $v(t)$ が既知の場合、あるいは推定できる場合には、式(1)はつぎのように変形される。

$$R \frac{dh}{dt} = S \frac{d\zeta}{dt} + A \cdot v \dots \dots \dots (2)$$

したがって、式(2)の右辺が求まれば、左辺を推定することができて、 $h(t)$ すなわちプランジャーの駆動をどのようにすれば、所要の波形が得られるかを知ることができる。とくに、断面 A の部分が狭窄部の場合には、断面 A の両側の水位差 $(\zeta_s - \zeta_o)$ によって流速 v

が表わされることになり、式(2)は近似的に

$$R \frac{dh}{dt} = S \frac{d\zeta_s}{dt} + C \cdot A \sqrt{2g(\zeta_s - \zeta_0)} \dots \dots (3)$$

と表わされる。ここに、 ζ_s : S の水域の水位、 ζ_0 : 模型水槽で S に含まれない水域の水位、 g : 重力の加速度、および C : 定数である。第1近似としてのプランジャーの駆動 $h(t)$ を上の式によって求め、プランジャーに関する $h-t$ 曲線をつくる。この $h-t$ 曲線を所要時間の範囲についてとりだし、時刻 t をカムの偏角 θ に、変位 h を半径方向の長さ r にとり、前述の制御用のカムを作成する。このカムを前述の電気油圧系の制御器にとりつけて駆動すると、カムの r に対応してプランジャーの変位 h が与えられ、 r の時間的变化 ($dr/d\theta$) / ($d\theta/dt$) は h の時間的变化となってあらわれる。実験波形と所要波形とを比較して、部分的な相違は前述した方法を考慮したうえで適宜修正していくことによって、任意の波形を発生させることができる。

4. 港湾模型における造波装置の特性

前述したような造波装置の1つの応用例をここに示す。すでに述べたように、津波のような長周期波は、いろいろの要因を考慮するとき、その波長を港湾模型の奥行の数倍とする必要にせまられる場合が少なくない。ここではK港を港湾模型の例にとり、実験した結果の概要を述べる。K港に進入する津波の波源は南海道沖から日向灘沖までの範囲にひろがり、さらに遠くチリ地震による津波(チリ津波と略称)が進入したこともある。これらの津波がK港付近に接近した場合、屈折や回折によって津波のフロントは水深 10~20 m の付近で等深線と

ほぼ平行になるものと考えられる。このことを考慮して、この場合の港湾模型を図-4のようにつくった。模型の縮尺は水平縮尺 1/250 および鉛直縮尺 1/100 とした。このひずみ 2.5 の模型では、一般に波の屈折や回折の影響が問題となる。Hawaii の Hilo 港の津波の模型実験においては、ひずみは 3 (水平縮尺 1/600) であったが、この実験で現地の津波の反射および屈折や回折が十分再現できたということからみて⁹⁾、K港の模型についてひずみによって生ずる影響はほとんどなく、このひずみの影響に対する補正はとくに必要でないであろうと考えられる。

K港の模型では測点 St. 1 における平均潮位を基準面とし、振幅 2 cm および周期 1 min の正弦波を発生させた場合には模型内では波の伝播とともに、波形は変形する。この変形を模型内の 28 測点について示したのが図-5である。各測点の位置は図-4に示されている。

K港の模型には、流入河川の流量を与えることができるようになっていて、A川およびB川について全流量 Q を 1.1 m³/min までいろいろの値に与えることができる。図-6には模型内の4測点、St. 1, St. 3, St. 17 および St. 21 (図中の4曲線は上からこれらの測点に対応している) について得られた周期 $T=1$ min の波形記録を示す。ただし、 Q をパラメーターにとり、 $Q=0$ l/sec, 1 l/sec, 2 l/sec および 4 l/sec の場合についての波形記録である。

測点 St. 1 における波高 $H_0=4$ cm および周期 $T_0=$

図-4 港湾模型平面図

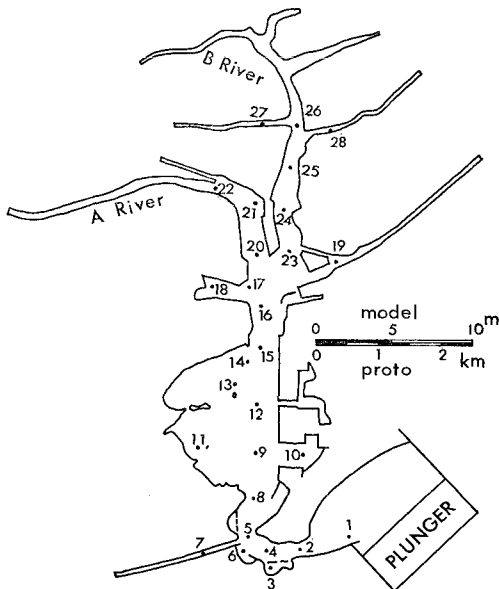


図-5 正弦波の伝播と変形の実験結果の一例

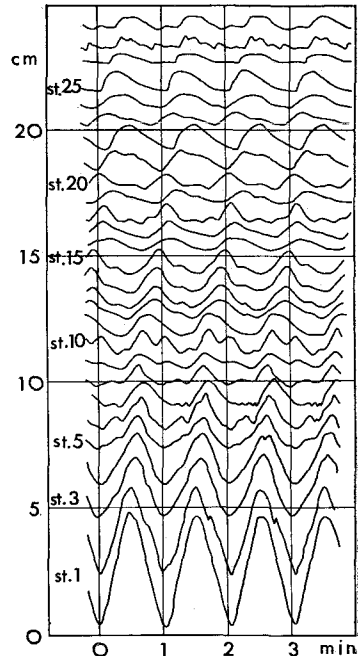
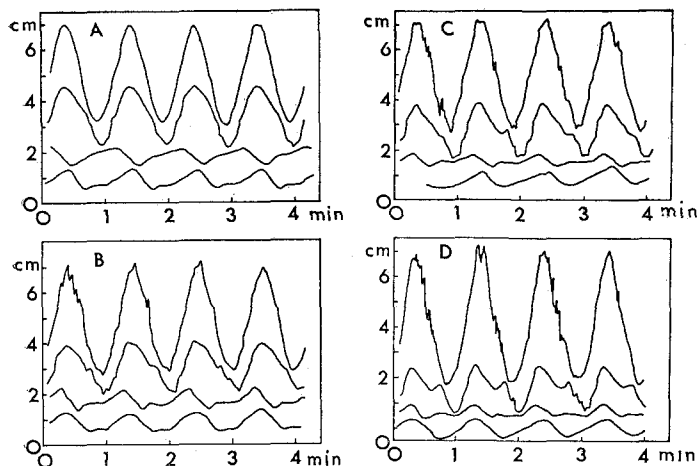


図-6 河川流による津波波形の変形

A: $Q=0$ l/sec, B: $Q=1$ l/sec, C: $Q=2$ l/sec, D: $Q=4$ l/sec

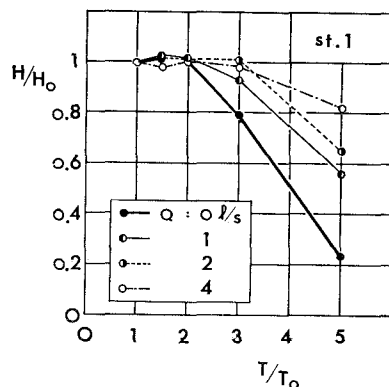
1 min の正弦波 ($Q=0$ l/sec の場合) を基準とし、任意の波の波高を H 、周期を T とする。プランジャーのストロークを一定にしておいた場合の H/H_0 と T/T_0 との関係は測点 St. 1 について図示すると、図-7 のようになる。これはK港の模型における津波造波装置の造波特性を示すものと考えられる。プランジャーのストロークを一定にしておいても、波の周期が長くなると波高は小さくなるが、波の周期に対する波高の減少率は、流量 Q が小さいほど顕著に大きく、このことは Yu の向い流れによる波高変化に示された傾向に一致している⁷⁾。さらに流速分布を考慮して、詳細な検討が必要であるが^{8), 9), 10)}、別の機会にゆずりたい。

5. チリ津波の再現性に関する実験

K港の模型として、図-4 に示すようなものを考えるとき、水平縮尺 1/250 および鉛直縮尺 1/100 であるから、力学的相似則を考慮すれば²⁾、流速縮尺は 1/10 および時間縮尺は 1/25 となる。さらに、摩擦係数は 1/0.4、流量は $1/(2.5 \times 10^5)$ となり、さらに Manning の粗度係数は 1/1.365 である。もちろん、この場合現地および模型とも対象とする流れは乱流であり、Manning の流速公式が適用できるものと仮定している。また、河口付近の密度流の問題は、ここではとくに考慮しない。これは津波進入時の河川流量は平常時の流量と考えられ、その流量はK港の潮流によるフラッシングにくらべてきわめて小さいからである。

ここで、問題となるのは模型において用いるべき粗度である。実際に、水平縮尺が与えられたとき、鉛直縮尺の大小によっては現地在乱流であっても、模型では層流の場合が起こりうる。このときには現地の乱流における摩擦係数の値と模型の層流におけるそれとの比が 1/0.4 になるようにしなくてはならない。とくに、現地でのそ

図-7 造波特性

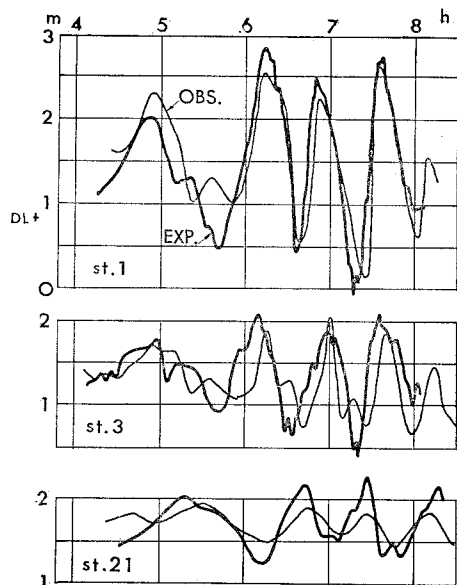


の値はほぼ一定値をとると考えてもよい場合が少なくないが、模型では一般に Reynolds 数の関数であり、ここで対象

とする津波は時間的に変動する現象であるから、この要請をつねに完全に満足させるようにすることは非常に困難である。Manning の抵抗則が適用できる場合には、模型における粗度係数は人工粗度を用いることによって、ある程度自由にええられるが、一方、摩擦係数は流れが層流の場合には通常的人工粗度では変化させることができない。したがって、本実験の場合には現地河川の状態および粗度の相似関係を、人工粗度に関する研究¹¹⁾に基づいて判断して、模型の河川部は 0.3~0.5 cm の粒径で代表される砂礫をモルタル仕上げの河床面にペイントではりつけて近似させ、実験時にその適否を確かめることにした。港湾部で礫の多い区域では、現地で Manning の粗度係数は 0.03 程度と考えられるから、模型においては 0.022 程度をとればよいであろう。したがって、ここでは、底面はモルタル刷毛仕上げで約 0.3~0.2 cm の粗度を与えるようにした。

K港におけるチリ津波の記録は測点 St. 1, St. 3 および St. 21 にある3つの検潮所で得られている¹²⁾。はじめに、前節に述べた理論に基づいて換算して、現地の津波記録のうちはじめの約 3.5 時間の記録について対比すると図-8 のようになる。図中、太線は実験波形であり、細線は現地記録である。波高としてはやや大きくなっているが、波形は対応しているようであるので、全体的にはほぼ一致していると考えられる。しかし、第1波において波形そのものが一致していない部分もある。したがって、前述したように実験波形とカムとの関係を検討して、カムの形状を修正し、できるだけ実験波形が現地記録に一致するように、力学的な考慮のもとに試行することにした。このようにして修正されたカムを用いて実験を行なって、図-8 と同様な操作によって実験波形と現地記録とを対比したものが図-9 である。測点 St. 1 の記録についてみると、波形は図-8 におけるよ

図—8 測点 St.1 におけるチリ津波の再現性実験



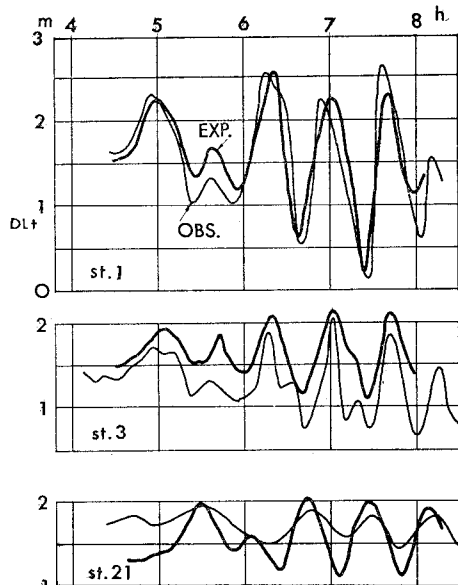
りもずっとよい一致を示しているといえる。この場合に、測点 St. 3 および St. 21 の各検潮所における津波の現地記録と実験波形とを対比したもの、図—8 および図—9 に示した。図—9 をみると、測点 St. 3 では実験波形が現地記録よりもやや高い水位を示している。この高さのずれは、実験誤差の範囲を越えているが、その原因を何にもとめるべきか検討する必要がある。測点 St. 3 の検潮所の立地条件から考えても、検潮所は K 港口の湾曲部の外側にある。津波の伝播におよぼす湾曲の効果は力学的相似則が成り立っていれば、現地も模型もそれぞれ対応しうることであるから、測点 St. 3 に関する 2 曲線は一致しなくてはならない。したがって、これ以外の要因の 1 つとして模型のひずみの効果があげられるが、さらに検討すべき問題であろう。

図—9 における測点 St. 21 の記録では、波高は現地記録にくらべて実験波高の方が大きく、約 2 倍になっているが、山および谷のみられる時刻はよく一致しているといえるであろう。波高について現地と実験との差が生じた原因もこれだけの実験結果からでは十分明確にはできないであろうが、測点 St. 21 の検潮所付近では港内航路から A 川へと河床が高くなっていることから考えて、この 1 つの要因として波の shoaling の現象があらわれているのではないかと推測されるが、この点についても、今後詳細に検討していきたいと考えている。

6. 結 語

津波造波装置をつくり、その機能および特性について検討し、この装置は 30 min より短い周期で、波高 5 cm 以下の任意波形をつくることを示した。これによって、任意波形をもった長周期波の実験が、若干

図—9 K 港におけるチリ津波の再現性実験



の制約はあるかもしれないが、十分可能になったと考えている。この場合、波の性質から、波高は港湾模型の境界条件にも支配され、その場合には波高は 5 cm 以上になることもありうる。

この津波造波装置を K 港の模型について適用し、チリ津波の再現が可能であり、津波のはじめ数波について力学的相似則を考慮すれば、現地記録と実験波形とがよい一致を示すことがわかった。

この装置を用いることにより、実験的に港湾における津波の問題を明らかにしていくことができると考えられるので、今後津波を含め長周期波の港湾における挙動の実験的研究を進め、これまで明らかにされていなかった諸問題を解明する端緒を与えるよう努力していきたい。

なお、本研究の遂行にあたり運輸省第三港湾建設局の関係諸官から熱心なご協力をいただいたことを明記して謝意をあらわす。

参 考 文 献

- 1) Iida, K. : Earthquakes accompanied by tsunamis occurring under the sea off the Island of Japan, Jour. Earth Sci., Nagoya Univ., Vol. 4, No. 1, 1956, pp. 1-42.
- 2) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について，海岸工学の最近の進歩，土木学会関西支部，1961，pp. 21-42.
- 3) Iwasaki, T. and A. Miura : On the model experiment of tsunami in Kesennuma Bay, Coastal Engineering in Japan, Vol. 5, 1962, pp. 49-57.
- 4) 岩崎敏夫，揚沢民：長波の研究用造波装置とその性状について（1），第 13 回海岸工学講演会講演集，1966，pp. 230-235，同 上（2），第 14 回海岸工学講演会講演集，1967，pp. 114-117.
- 5) Palmer, R. Q. and G. T. Funasaki : The Hilo harbour tsunami model, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., Vol. II, pt. 4, 1966, pp. 1227-1248.

- 6) 中村重久：水圧式造波装置とその模型実験への応用について，京大防災研年報，No. 12 B, 1969, pp. 645-655.
 - 7) Yu, Yi-Yuan: Breaking of waves by an opposing current, Trans. AGU, Vol. 33, No. 1, 1952, pp. 39-41.
 - 8) Sarpkaya, T.: Oscillatory gravity waves in flowing water, Trans. ASCE, Vol. 122, Pap. No. 2873, 1957, pp. 564~586.
 - 9) Hunt, J.N.: Gravity waves in flowing water, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 231, 1955, p. 496.
 - 10) 浜田徳一，加藤始：流れをさかのぼる波についての一計算，第8回海岸工学講演会講演集，1961, pp. 25-29.
 - 11) 足立昭平：固定床河川模型水路の人工粗度に関する研究，学位論文，京都大学，1961.
 - 12) チリ津波合同調査班：1960年5月24日チリ地震津波踏査速報，1960.
-