

II-8 噴火湾の津波波高分布の推定

室蘭工業大学 正会員 近藤 俊郎

室蘭工業大学 学生員 米津 仁司

【1】はじめに

我国の太平洋沿岸は、環太平洋地震帯に属し過去に多くの津波が発生しているが、湾内に大型津波が来襲した時の湾水の挙動は、まだ未知なことが多い。噴火湾は、高潮、高波などもなく比較的穏やかな湾としての性質を持つが、今後起こるかも知れない湾岸での異常波浪等による災害に対処するため、また湾内の海洋、空間の利用のために、湾内の応答特性を知ることが重要となる。

北海道太平洋沿岸は世界で最も地震活動の活発な地帯の一つであるが、地震に伴う津波も多く発生し、沿岸一帯に多大の被害をもたらした。噴火湾に影響を及ぼした歴史津波には、十勝沖地震津波(1952年3月4日)、チリ地震津波(1960年5月24日)、十勝沖地震津波(1968年5月16日)、根室半島沖地震津波(1973年6月17日)等が主に挙げられる。チリ地震津波については、南アメリカのチリ沖で起きた津波がはるばる太平洋を渡り23時間近くかかって24日の未明、太平洋沿岸全域を襲い被害がでている。しかし、噴火湾においては、ある程度の津波波高が観察されたに過ぎず、北海道東部のような被害はでていない。

一般に大規模な津波に対する湾内の応答特性を知るには、数値解析、水理模型実験などが有力な手段として挙げられる。本研究では、噴火湾を対象として将来湾に来襲する可能性のある大型津波を想定した小縮尺の歪模型実験を行ない、差分法による数値シミュレーションの結果と比較し、小縮尺歪模型の適応性を調べるとともに、この湾での津波波高分布を推定した結果を報告する。

【2】実験装置及び実験方法

(1) 模型水槽

本研究では、実験水槽(3.6m×4.7m)に適合させた水平縮尺 $X_r=1/40000$ を用い、鉛直縮尺 $Z_r=1/1000$ として波高を小さくしないことを便宜的に行なった歪模型を採用した。

(2) 相似則と縮尺

歪模型における各物理量の縮尺比は、長波を対象とした歪模型相似則に基づきものとして求めた。時間及び粗度係数の縮尺比は表-1のように $T_r=7.9 \times 10^{-4}$ 、 $n_r=2.00$ となる。

(3) 粗度係数

模型の水底材料であるモルタルの粗度係数は、約0.015と推定される。一方、現地海底粗度を、海底質の粒径から推定すると

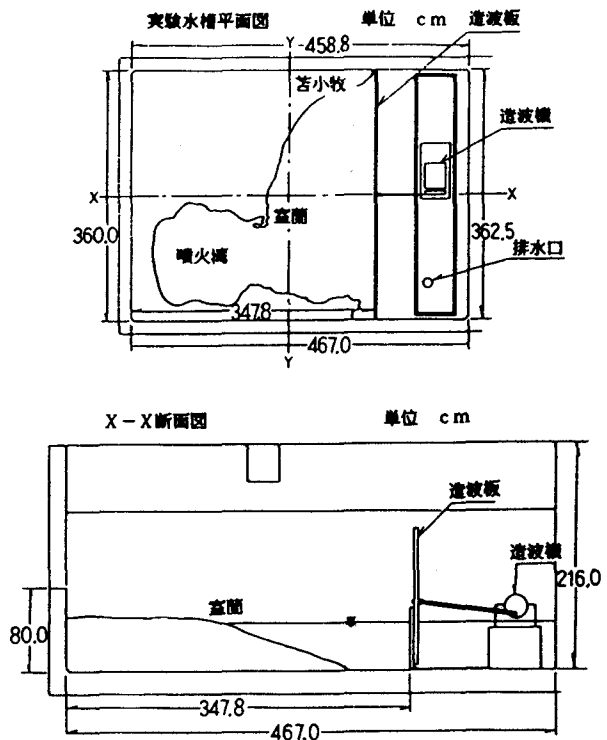


図-1 模型水槽

約0.012 となり、模型の粗度係数は0.024 となる。よって、その適合性を検討するために、人工粗度として5mm 角の木材による点状粗度により0.024,更に0.021の粗度係数を設定した。

(4) 模型地点と測定地点

実験対象海域の等深図は図-2に示す。波高測定地点は、同図に示すように噴火湾の中央線上を縦断する1～15地点及び、湾口を横断する16～21地点に決定した。

(5) 実験方法

波高を測定するにあたって、湾口に相当する6地点及び湾奥に相当する14, 15地点においては、次に述べる全ての周期について波高を測定し、ピークが現われた周期について2～13地点及び16～21地点も測定した。その際1地点での波を模型津波の入射波と考え常時測定した。模型津波は、過去に対象海域に来襲した津波を参考にして、大陸棚外の入射波高を原型で10mすなわち模型で1cmに固定し、周期は原型で10～31分(模型では0.47～1.47秒)のものを対象とした。実験は、水深の深い地点に平行抵抗線式波高計を、浅い地点には短いステンレス丸棒を用いた自家製の波高計を設置し、造波機で起こした波をベンオシロに出力させ波高を測定した。更に、0.021, 0.024に相当する人工粗度を配置して、同様の実験を行なった。

表-1 歪模型の縮尺

物 理 量	ディメンジョン	縮 尺
時 間	T	$X r Z r^{-1/2}$
マニングの粗度係数	$L^{-1/3} T$	$X r^{-1/3} Z r^{2/3}$

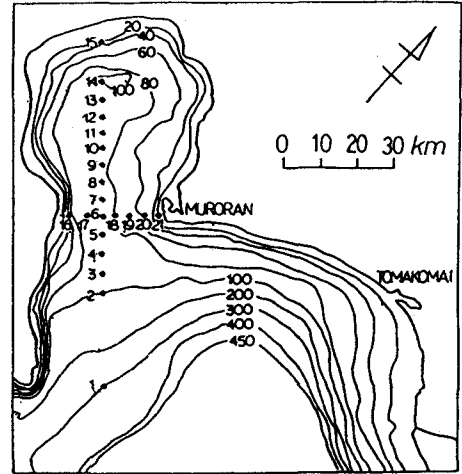


図-2 測定点及び等深図

【3】実験結果

図-3は、湾中央線上にある6,14,15地点の波高を、入射波高に対する波高比として周期別に示したものである。湾口にあたる6地点では15分, 28分付近において、また湾奥にあたる14, 15地点では22分, 28分付近において高い波高比が観測された。この理由として考えられるのは、噴火湾固有の副振動の周期とこれらの周期の津波が同調し大きな定常波が形成されたということである。このような周期特性は、湾内の検潮記録とほぼ一致していることが認められる²⁾。(図-5参照)

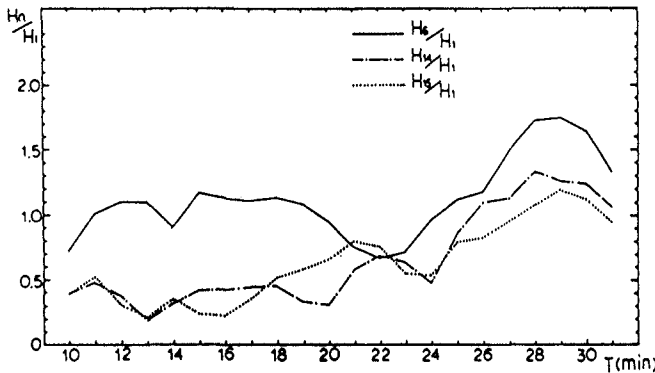


図-3 周期による波高比の変化

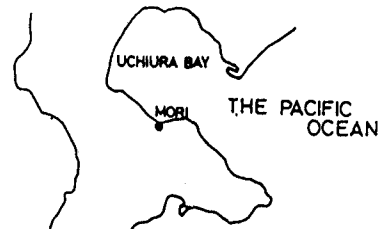


図-4 噴火湾と検潮位置

図-6は、ピークをもたらした周期(15分,22分,28分)の縦断方向(2~15地点)の波高比を測定点に沿って示したものである。図において、28分の周期の波高が他の周期の波高に比べて、湾内にあたる6~15地点で特に高くなっている。これは、湾内では周期的な入射波による湾水の共鳴によって定常波が形成されて大きい波高となるが、湾口の外側の

3~5地点では、そのエネルギーが流れに変わっていることによると考えられる。15分,22分の津波は、28分の津波よりも湾内でのエネルギーレベルがかなり小さいため波高が小さくなっている。また、分布形状の違いは、振動形態の違いによるものと思われる。

図-7は、横断方向(16~21地点)の周期別波高比分布である。図において、各周期の兩岸(16,21地点付近)での波高に違いが見られるが、これは兩岸での反射波の影響の違いによるものと思われる。また、苫小牧方面からの波との合成を考えると、大きいエネルギーを持つ長周期の波ほど波高が大きくなる傾向が見られる。

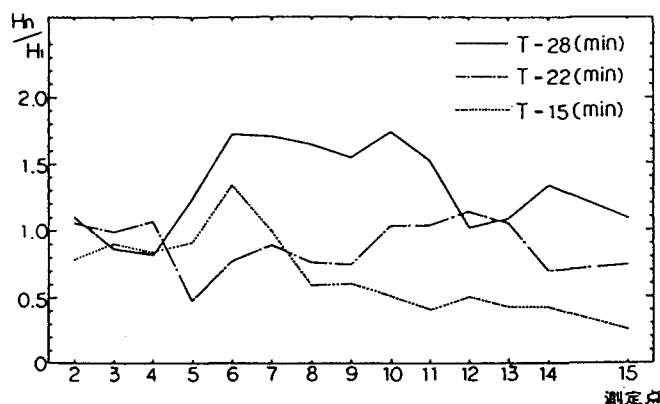


図-6 波高比の縦断方向分布

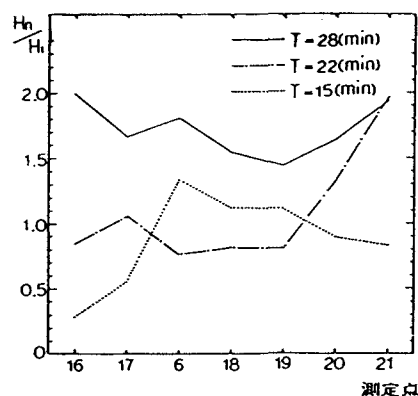


図-7 波高比の横断方向分布

図-8~図-10は、岸に近い15, 16, 21地点での調和解析を、最も大きいピークの現われた28分の津波について粗度別に行なった結果である。図において、15地点では強い高調波成分が現われているが16, 21地点においてはあまり現われていない。これは、湾内で水深が浅い15地点で

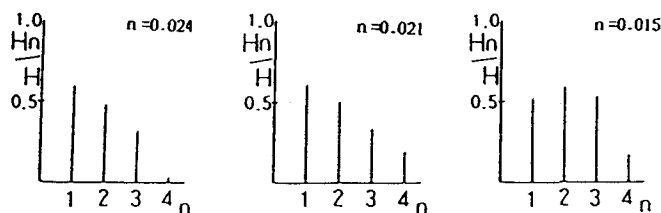


図-8 粗度別高調波成分(測定地点 15, 周期 $T=28$ 分)

は部分碎波となっていることによると思われる。16, 21地点の波については、両岸での反射などによる合成波があまり碎波していないことが考えられる。いずれの図も、粗度の違いによる高調波成分に極端な差はみられない。しかし、粗度要素として水深に比べて大きい 5mm 角の木材を用いた影響や、測定地点と粗度要素の位置関係による影響が若干見られるようである。以上の実験結果から、粗度係数 0.015~0.024 の範囲では粗度の及ぼす影響は小さく、また高橋³⁾らによる計算結果では、28 分の津波は湾内を一周する全長が 3 波長の振動と解釈されていることを考慮すると、湾の応答特性は主として湾の形状に大きく支配されると言える。

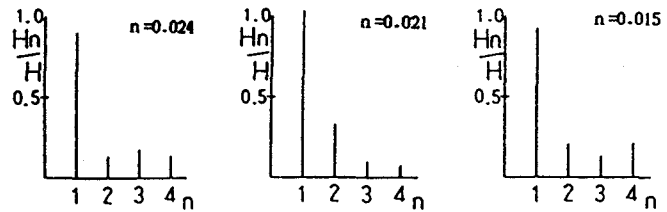


図-9 粗度別高調波成分 (測定地点 16, 周期 T=28 分)

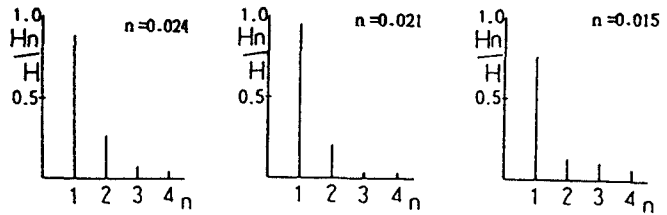


図-10 粗度別高調波成分 (測定地点 21, 周期 T=28 分)

【4】数値解析

(1) 概説⁴⁾

計算のための基本式は、流速について鉛直方向に積分し二次元化した、長波近似のナビエ・ストークス方程式を差分化したものである。x, y 軸を水平面に取り、鉛直下向きに z 軸の正の向きをとる。静水面からの海面の変位を $z = -\eta$ とする。

長波の運動方程式

$$\frac{Du}{Dt} = fv + \tau_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -fu + \tau_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$g = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3)$$

において、 $f = 2\omega \sin \phi$ 、 ω は地球の対恒星自転角速度、 ϕ は緯度、 τ_x, τ_y は海水と海底の間の摩擦抵抗 $\tau = \rho \gamma^2 |V| V$ の x, y 方向成分、 γ は海底の抵抗係数、 V は流速で u, v はその x, y 方向成分、また ν は海水の粘性係数、 P は圧力である。一般には $\gamma^2 = 0.0026$ を用いる。

圧力 $P(z)$ は、 $P(-\eta) = P_0$ とすれば

$$P(z) = P_0 + \int_{-\eta}^z g \rho dz = P_0 + g \rho (\eta + z) \quad (4)$$

したがって (1), (2) 式は

$$\frac{Du}{Dt} = fv + \tau_x - g \frac{\partial}{\partial x} (\eta + z) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -fu + \tau_y - g \frac{\partial}{\partial y} (\eta + z) + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (6)$$

となる。海面 ($z = -\eta$) の鉛直方向速度 w_s は

$$w_s = -\frac{D\eta}{Dt} = -\frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} - v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (7)$$

一方、連続の方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

で、(5)~(8)式が、長波としての波動の基礎方程式となる。

長波の水粒子速度は、海面から海底まで水平方向に一定と考えて良いから、 z 方向に水平流速の変化はないものとして、(5)~(8)式を二次元化する。すなわち、流速を $z = -\eta$ から海底 $z = h$ まで積分し、

$$M = \int_{-h}^{-\eta} u dz, \quad N = \int_{-h}^{-\eta} v dz \quad (9)$$

を得る。M、N は単位幅を持ち、海底から海面までの高さを持つ垂直断面を通過する流量であって、これらを線流量と呼ぶ。これから z によらない水平流速として改めて u 、 v を用いて、

$$u = \frac{M}{h + \eta}, \quad v = \frac{N}{h + \eta} \quad (10)$$

が定まる。更に(5),(6),(8)式を積分し、(10)式を用いることによって、水平二次元化した運動方程式が導かれる。

境界条件として、海岸線ではその法線方向の線流量を0とする。外海に開かれた境界上では、そこでの法線方向流量が長波の水粒子速度に等しくなるものとする。したがって、格子で近似した海岸線上で、その法線方向流量は、

$$M = 0 \quad \text{または} \quad N = 0$$

外海境界上で同じく

$$M = \eta((h + \eta)g)^{\frac{1}{2}}$$

または

$$N = \eta((h + \eta)g)^{\frac{1}{2}}$$

計算領域は図-11 に示すものとし、この間の地形を LARGE MESH については一辺10km、SMALL MESH については一辺がその3分の1の正方形格子で近似分割した。水深 h 、波高 η は格子中央の値を取り、その格子内では一定として用いることとし、線流量M、Nは格子上で与え、その線上では一定とする。計算の TIME STEP は $\Delta = 10$ sec とし、10,000 sec 後までの波高を計算した。

(2) 計算結果

図-12 は、計算された津波波形の図-11 における POINT 1 での結果である。図において、第1波は約2700sec後に到達しており、波源域との距離を約300kmとすると波速は約1

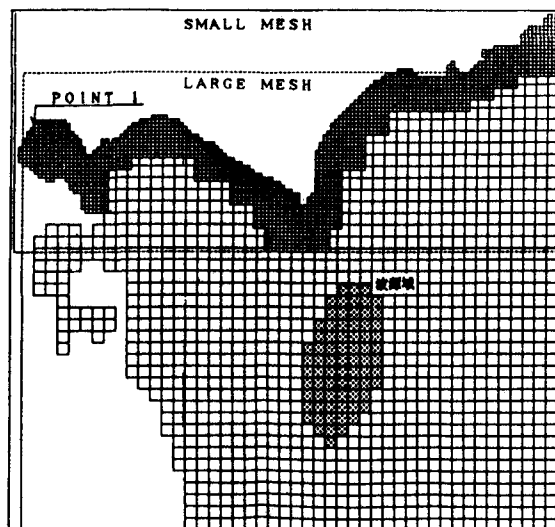


図-11 太平洋沿岸津波計算用格子図

10m/sとなる。その後、後続の波により不規則な波形を示すが、5500sec～7000sec位の間では、実験と同様に湾水振動によりほぼ定常波(波高約0.04m)が形成されていると解釈できる。そのため、波の減衰がほとんど見られず振動が長時間継続している。また、第1波目からこの津波の初期周期は約1000secすなわち約17分と推定され、波源域での初期波高(約0.1m)に対する波高比は約0.4 となる。図

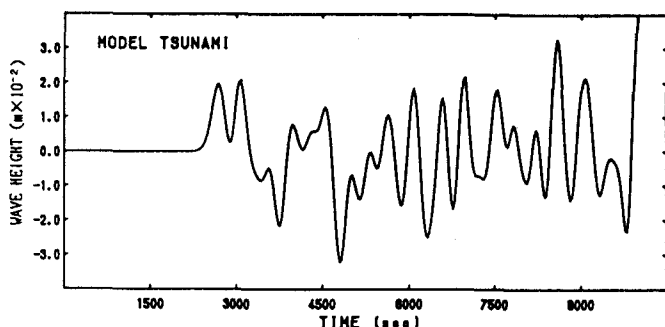


図-12 MODEL津波波形

-11における POINT 1 は、実験での15地点(図-2参照)にほぼ対応することから、図-3と比較すると、数値解析と模型実験の波高はほぼ一致していることが認められる。

【5】結び

噴火湾はその形状により、到達した波はすぐには減衰せず振動が長時間継続するということが今回の実験及び数値解析により確認された。特にその応答特性は主にその湾の形状に影響され、他の要因(粗度係数など)の影響は小さく、小縮尺歪模型によっても湾内の津波波高分布は推定できると言える。今後は、更に数値解析を追求し、水平寸法と鉛直寸法の比を歪ませた場合の問題へと発展させていく予定である。

終わりに、本研究の数値解析は北大工学部 高橋 将 先生の「太平洋津波シュミレーション」プログラムを借用して行なったものであり、同先生のご厚意に深く感謝を致します。

《参考文献》

- 1) 近藤・竹田：『消波構造物』（森北出版，1983）
- 2) 高橋：『津軽海峡と内浦湾における津波特性』（第23回海岸工学講演会論文集，1976）
- 3) 高橋・八鍬：『北海道太平洋岸の津波スペクトルに見られる特徴について』（自然災害科学資料解析研究，9，1982）
- 4) 高橋：『石狩湾の津波と副振動』（北海道大学工学部研究報告第130号，1986）