

地滑りや氷河崩壊による 津波の生成に関する水理実験

AN EXPERIMENTAL STUDY ON TSUNAMI GENERATION DUE TO
LANDSLIDES OR GLACIER COLLAPSES

劉 魯安¹・柿沼太郎²・入船裕丞³・中村和夫⁴
Roan RIU, Taro KAKINUMA, Yusuke IRIFUNE, and Kazuo NAKAMURA

¹ 修(工) 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻
(〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

² 正会員 博(工) 鹿児島大学大学院准教授 理工学研究科海洋土木工学専攻 (同上)

³ 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (同上)

⁴ 鹿児島大学大学院専門技術職員 理工学研究科技術部 (同上)

Hydraulic experiments were performed to simulate tsunami generation due to landslides or glacier collapses. Fallen particles are glass balls, natural rocks, acrylic rocks, and ice balls, as well as packages of glass balls. The gate can be opened smoothly and quickly by pushing down two levers connected with the gate plate. On a mild slope, tsunami profiles depend on the diameter of the sliding glass balls. In shallow water, the slide distance of particles is longer, the tsunami height becomes larger. The ice balls or the ice body can also generate large tsunamis, although the ice does not sink deep under the water. The period of tsunamis generated by the ice balls is shorter through the surfacing of the fallen ice than that due to the glass balls of higher density.

Key Words : Tsunami, landslide, tsunamigenic earthquake, glacier collapse

1. 序 論

地滑りにより生成される津波は、断層運動によって引き起こされる津波に比べて発生頻度が低いものの、歴史的に見てその規模・被害ともに大きくなる可能性が高い。1792年には、眉山の山体崩壊によって発生した津波が有明海を伝播し、対岸の肥後・天草に被害を出した¹⁾。また、氷河崩壊による津波生成の報道もなされており、地球の温暖化が進めば、こうした氷河崩壊の発生頻度が増すことが危惧される²⁾。

こうした、土砂等の崩壊に起因する津波が地震によって発生する場合、その地震は、津波地震となる危険性がある³⁾。なぜならば、断層運動だけでは、大きな津波が発生しない場合であっても、その断層運動によって誘起される地滑りに伴い副次的に津波が発生し、または、津波が成長し、地震動のデータに基づく予測を超えるような大きな津波が現れ、大規模な被害をもたらされる可能性があるからである。例えば、1771年明和地震津波では、地震の揺れが大きくなかったにも関わらず巨石の流出が見られたという記述が残されており、地震によって海底地滑

りが発生した可能性が指摘されている。南西諸島海域では島嶼が断続的に連なっていることからわかるように、海底地形が複雑で急峻な場所も多く、地盤を構成する地質によっては、海底地震が地滑りを誘発する可能性が高いであろう。

地滑りや氷河崩壊は、津波地震の分類⁴⁾によると、「流体と相互干渉する地変」の一種と言える。地滑りの崩落体が、水面に突入し、または、海底地滑りのように水中で運動するとき、崩落体を構成する鋼体、塑性体や粒子群が、流体と相互干渉しながら津波を生成する。このため、地滑りや氷河崩壊に伴う津波の発生過程には、複雑で不明な点が多い。

地滑りに伴う崩落体に起因する津波発生過程の詳細な水理実験は、これまでのところ、今村ら⁵⁾、重松・河野⁶⁾及び柿沼ら⁷⁾等による研究に限られている。このうち、今村ら⁵⁾では、土砂が、また、重松・河野⁶⁾では、同一粒径のガラスビーズが崩落体として用いられ、粒径や形状といった粒子の特性については、言及されなかった。また、柿沼ら⁷⁾では、粒径の異なるガラス球やガラスビーズを用いて、生成される津波に対する粒径の影響が調べられたが、水槽全長が約 2.0 m と比較的短かったため、摩擦や粘性に起因する減衰と異なる、伝播に伴う津

波の変形が終了しておらず、定常的な津波高さを議論するに至らなかった場合があると考えられる。ここで、「津波高さ」を「各地点において水面変動が示す最大値」と定義する。

そこで、本研究では、より水槽長の長い津波実験水槽を用いて、様々な粒径の球状粒子、ロック状粒子、粒子塊、そして、氷を対象とした水理実験を行ない、崩落する粒子群と誘起される津波の特性との関係を検討する。

2. 実験装置

図-1 に示す長さ 4.0 m、幅 0.2 m の津波生成実験水槽を製作した。水槽の側面及び底面は、アクリル板で構成されている。この水槽に、比重約 1.0 の水を注入する。

ゲートの岸側斜面上に粒子群を積載しておき、ゲートを引き上げると、粒子群が崩落し、津波が生成される。約 2 mm 厚の鋼板製のゲートは、図-1 に示すレバーを操作することにより、瞬時に上昇する。ゲートの左右の端縁付近は、固定枠に切られたスリット内を滑らかに移動する。また、固定枠のゲート上方には、ウレタンが張っており、ゲート停止時の衝撃が吸収され、実験水槽は、ゲート操作時に殆ど振動しない。このようなゲートの上昇により、崩落粒子は、積載時の位置によらずほぼ同時にゲートからの拘束力から解放される。

鉛直ゲートの下端に接するように、水槽内に斜面を設置する。滑面に研磨されたアクリル板で作られた斜面は、取り替え可能であり、斜面勾配を変えることができる。

ゲートを鉛直方向に設置し、積載時の崩落粒子の沖側面を鉛直面とした。斜面勾配は、 $\beta = 30, 45$ 及び 60° の 3 通りである。本論文の実験では、沖側の一様静水深 h は、9, 14, 19, または、24 cm とした。

なお、ある位置より沖側に粒子群が水路床上を移動できないようにするために、水路床上にストップを設置する場合があるが、このストップは、約 20 mm 角の断面を持つ水路幅長の角柱であり、水路幅に渡って水路床上に固定される。

3. 崩落粒子と実験方法

対象とした粒子は、次のような 4 種類に大別される。すなわち、1) 球状粒子、2) ロック状粒子、3) 粒子塊、そして、4) 氷である。

1) 球状粒子は、図-2 のような、粒径 28.9, 19.8 及び 11.6 mm の大・中・小 3 種類のガラス球である。比重は、いずれも約 2.6 である。本実験では、崩落粒子の粒径の違いが津波高さに及ぼ

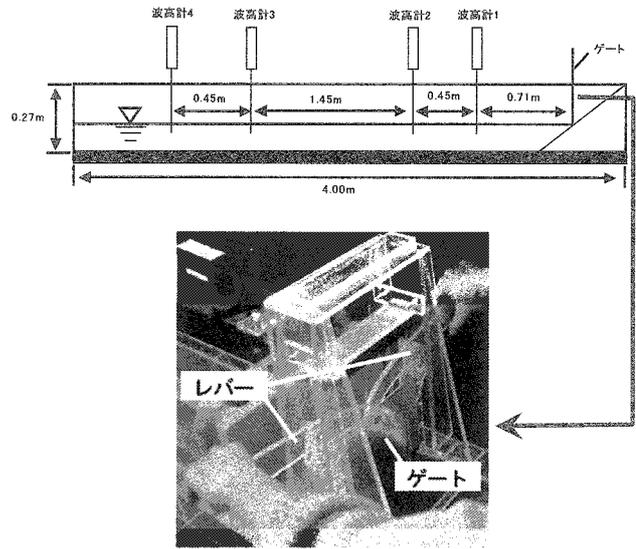


図-1 津波生成実験水槽

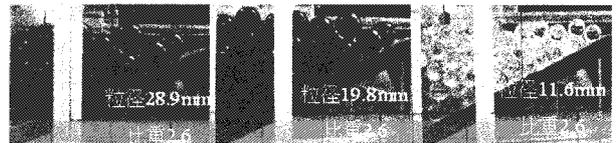


図-2 球状粒子を用いた実験における各粒子群（左より、大、中、小 3 種類のガラス球の積載状況を示す。）

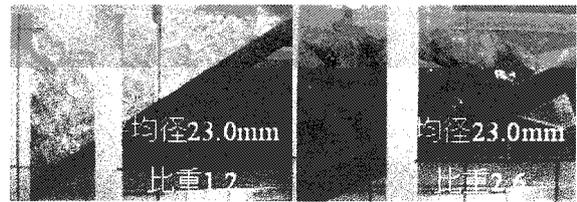


図-3 ロック状粒子（左：アクリルロック、右：自然石）



図-4 氷（左：直角二等辺三角柱状の氷塊、右：球形の氷）

す影響に着目する。

2) ロック状粒子は、図-3 のような、自然石及びアクリルロックである。このうち、自然石は、山石系中礫であり、アクリルロックは、自然石の形状を持つアクリル製のブロックである。両者の平均径は、共に約 23.0 mm であり、比重は、自然石が約 2.6、アクリルロックが約 1.2 である。ロック状粒子は、球と異なる噛み合わせを有する粒子である。

- 3) 粒子塊は、粒子群を上・下層に分け、各層をビニール・ネットで包んだ球状粒子塊、または、包まない球状粒子群として、それぞれの質量比を変えて実験を行なった。このような粒子塊によって、一体となって比較的大きな塊として落下する崩落体を再現する。
- 4) 氷は、**図-4**のような、粒径が約 29.0 mm の球形の氷と、幅約 20.0 cm、質量約 2.0 kg の直角二等辺三角柱状の氷塊である。このうち、球形の氷は、市販のものである。他方、氷塊は、木製の箱を作り、それに水道水約 2.0 kg を注入し、冷凍庫で凍らせて作成した。**図-4**の左図は、この箱から取り出した直後の氷塊を示している。この氷塊を勾配 $\beta = 45^\circ$ の斜面上に、上面が水平になるように載せる。

図-1 に示す 4 箇所を設置した波高計により水面変動を測定した。ゲート ~ 波高計 1 ~ 波高計 2 ~ 波高計 3 ~ 波高計 4 の設置間隔は、それぞれ、0.71, 0.45, 1.45, 及び 0.45 m とした。更に、2 台のデジタルビデオカメラを用いて、粒子群の水中突入状況及び水中での運動の様子と、生成された津波の水面波形を撮影した。

本論文では、初期状態において、水路底面よりゲート下端初期位置までの高さを沖側静水深と等しくした場合に関して述べる。すなわち、ゲート下端初期位置が初期汀線に接している場合を対象とする。

また、ここでは、津波高さを比較する各ケースにおいて、粒子群の全質量を揃えて実験を行なった。このように崩落体を積載したとき、上面の位置にあまり差が見られないことを確認した。すなわち、崩落体の初期の位置エネルギーと重心位置とを揃えていると言える。全質量をより大きくする等して、上面の位置の違いが無視できない場合は、重心を揃えるといった初期条件の再確認が必要になる。なお、水面突入速度は、崩落体の初期の位置エネルギーと重心位置が等しい場合でも、一般に、粒径や密度といった崩落粒子の条件や、粒子の初期位置等に依存することになる。

4. 球状粒子の粒径及び斜面勾配と津波高さの関係

まず、斜面より沖側の水平床上の静水深 $h = 14.0$ cm、斜面勾配 $\beta = 60^\circ$ の場合に、ガラス球(小)を用いて 3 回の実験を実施した。各ケースにおいて、粒子群の全質量 W を約 3.0 kg に揃えて実験を行なった。これら 3 ケースの任意の時刻における波形は、ほぼ重なった。ゲートを瞬時に滑らかに引き上げる機構を工夫したため、再現性のよい実験データが得られることがわかった。

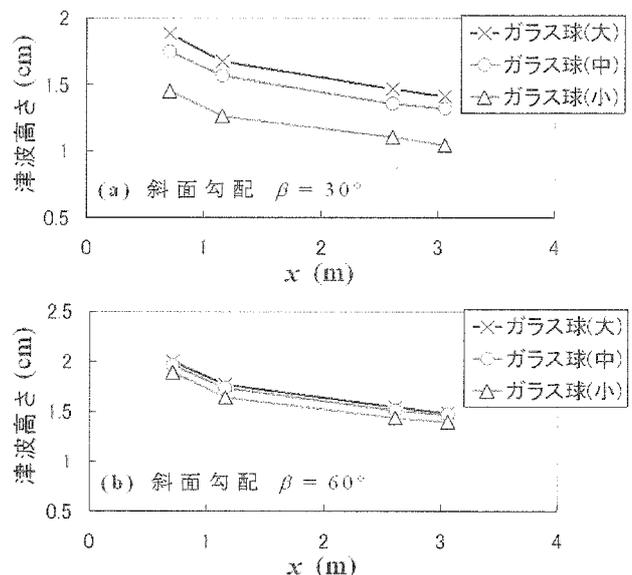


図-5 各粒径のガラス球による津波の津波高さ ($h = 14.0$ cm, $W = 3.0$ kg)

次に、各ケースにおいて、粒子群の全質量 W を同様に約 3.0 kg に揃えて、 $h = 14.0$ cm, $\beta = 30^\circ$ 、または、 60° の場合の実験を行なった。この場合に生成される津波の津波高さをそれぞれ**図-5**に示す。

本研究で行った実験では、全てのケースにおいて波高の減衰が見られたが、**図-5**に示すように、波高計 1 から波高計 2 の間の減衰率が大きかった。これに対し、波高計 2 ~ 波高計 4 の間の減衰率は、低減する。柿沼ら⁷⁾において津波高さを検討した波高計 3 の設置位置は、本研究の波高計 2 の設置位置と同じ場所であったため、水槽全長が約 2.0 m の柿沼ら⁷⁾の場合には、伝播に伴う津波の変形が終了していなかったことになる。他方、波高計 2 ~ 波高計 4 の間の波高減衰率は、ほぼ一定であるため、この区間における減衰は、摩擦や粘性に起因する減衰であると考えられる。また、個々の津波の波形は、波高計 2 の設置位置より沖側では、前後にほぼ対称な形を示しており、ここでは、波高の減衰率が一定となった時点で津波が安定して伝播していると判断した。

図-5より、斜面勾配が緩やかな $\beta = 30^\circ$ の場合、ガラス球の粒径による津波高さの違いが大きく現れた。すなわち、粒径が大きいほど津波高さが大きい。また、崩落過程において、 $\beta = 60^\circ$ の場合には、上部に積載されたガラス球が先行して水面に突入する。逆に、 $\beta = 30^\circ$ の場合には、下部に積載されたガラス球が先行して水面に突入する。斜面勾配が急である $\beta = 60^\circ$ の場合、各粒子の崩落が鉛直落下に比較的近くなり、津波波形と津波高さが粒子の径に依存しにくくなる。

なお、各波高計の設置位置において、球状粒子により生成される津波の津波高さは、 $\beta = 60^\circ$ の場合が $\beta = 30^\circ$ の場合よりも高くなっている。

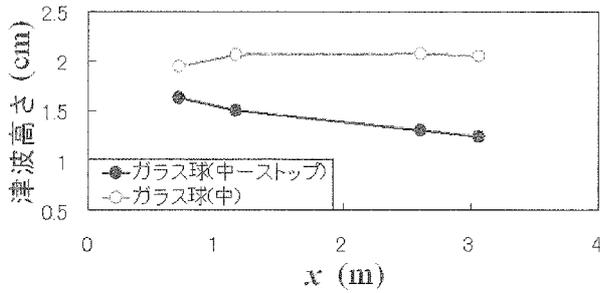


図-6 ストップの有無と津波高さの関係 ($h = 9.0 \text{ cm}$, $\beta = 30^\circ$, $W = 3.0 \text{ kg}$)

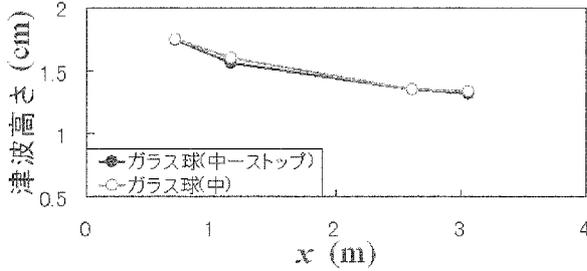


図-7 ストップの有無と津波高さの関係 ($h = 14.0 \text{ cm}$, $\beta = 30^\circ$, $W = 3.0 \text{ kg}$)

5. 水底上を冲向きに移動する粒子群による津波の成長

各ケースにおいて、球状粒子群の全質量 W を同様に約 3.0 kg に揃え、 $h = 9.0 \text{ cm}$, $\beta = 30^\circ$ とした場合の、ガラス球(中)により生成される津波の津波高さを図-6 に示す。ここで、「ガラス球(中-ストップ)」の場合、水路床上の波高計2の設置位置にストップが固定されており、粒子群がこの位置より沖側に移動できない。ストップを設置しない場合、ガラス球(中)により生成された津波の津波高さは、波高計1の設置位置よりも、波高計2の設置位置における値が大きくなっている。これは、水深が比較的浅く、水平な水路床上を冲向きに移動する粒子群が、津波の成長に寄与する効果が大きいからである。他方、ストップを設置した「ガラス球(中-ストップ)」の場合には、津波があまり成長せず、波高計1の設置位置よりも、波高計2の設置位置における津波高さが低くなっている。

なお、本論文の実験において、この「ガラス球(中-ストップ)」の場合以外のケースでは、ストップを設置していない。

崩落粒子の滑動距離は、崩落粒子の粘着力や噛み合わせに依存すると考えられるが、特に、水深が浅い場合、津波高さの違いに影響を及ぼすであろう。

ゲート下端初期位置を水路底面から 14.0 cm の高さに設置して、静水深を比較的深い $h = 14.0 \text{ cm}$ とした場合には、図-7 のように、 $h = 9.0 \text{ cm}$ の場合ほどストップの存在の影響を受けなくなる。

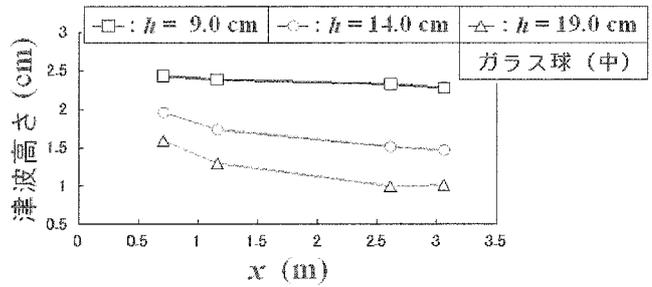


図-8 沖側静水深と津波高さの関係 ($\beta = 60^\circ$, $W = 3.0 \text{ kg}$)

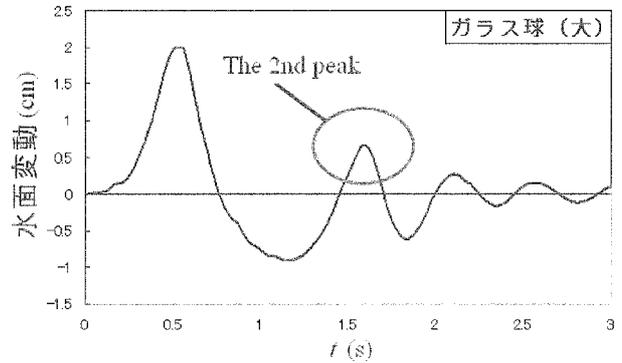


図-9 ガラス球(大)の場合の波高計1の設置位置における水面変動 ($h = 14.0 \text{ cm}$, $\beta = 60^\circ$, $W = 3.0 \text{ kg}$)

なお、初期状態において、水路底面からゲート下端初期位置までの高さを静水深と等しくする場合、津波高さは、図-8 に示すように、沖側静水深が最も浅い $h = 9.0 \text{ cm}$ のとき、最大となる。ここで、各ケースにおいて、ガラス球(中)の全質量を約 3.0 kg に揃え、斜面勾配を $\beta = 60^\circ$ としている。これは、ストップの有無の比較で述べたように、水深が比較的浅い場合には、粒子群が水平な水路床上を冲向きに移動することにより、津波の成長が促進されるからである。

6. 比重が1より大きい粒子群による津波の第2波の生成

粒子群の全質量 W を約 3.0 kg とし、 $h = 14.0 \text{ cm}$, $\beta = 60^\circ$ として、ガラス球(大)を用いた実験の、波高計1の設置位置における水面変動を図-9 に示す。第2波のピークが現れているが、これは、粒子群の突入に起因して生成した岸向きの波が、斜面で反射し、その後、波高計まで伝達したものである。

7. 粒子の形状が津波高さを与える影響

各ケースにおいて、粒子群の全質量 W を約 2.0 kg に揃えて実験を行なった。斜面より沖側の水平床上の静水深 $h = 9.0 \text{ cm}$, 斜面勾配 $\beta = 60^\circ$ の場合の自然石、または、アクリルロックにより生成され

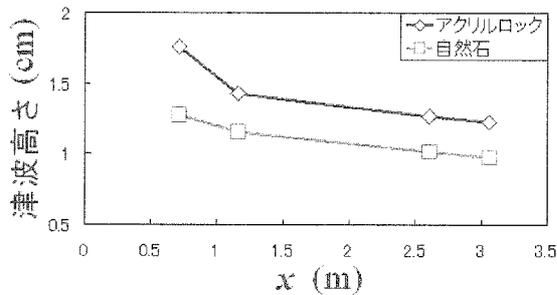


図-10 ロック状粒子により生成される津波の津波高さ ($h = 9.0 \text{ cm}$, $\beta = 60^\circ$, $W = 2.0 \text{ kg}$)

る津波の津波高さを図-10 に示す。なお、ロック状粒子を用いた実験においても、球状粒子を用いた実験と同様に再現性が良い結果が得られることを確認した。

斜面上において、自然石とアクリルロックの両者とも、ガラス球よりも噛み合わせが働き、ガラス球のように素早く1段になることがなく、より長い時間、数段に重なったまま運動する様子が見られた。そして、自然石は、粒子同士の噛み合わせが強固であるため、崩落に時間を要し、生成される津波の周期が長くなり、その結果、津波高さがアクリルロックより低くなる。他方、アクリルロックは、自然石と類似の形状を有するが、比重が軽く、摩擦力と噛み合わせが弱いため、自然石の場合よりも津波高さが高くなる。

粒子の噛み合わせが強いと、上段の粒子の重みが下段の粒子にかかっている時間が長くなり、斜面と下段の粒子の間の摩擦が比較的大きい時間が長くなると考えられる。また、粒子が噛み合っていると、粒子1個単位の転がりや抑制されるであろう。これらが、粒子の崩落時間、そして、津波高さに影響を及ぼす。

8. 粒子塊の質量比と津波高さの関係

地滑りや氷河崩壊では、崩落体の一部が一体となって、比較的大きな塊として落下する場合がある。そこで、粒子を上層と下層に分け、上層の粒子をビニール・ネットで包んで粒子塊とし、他方、下層は、ネットで包まない粒子群とする。ネットを構成するビニール糸は、直径約 0.3 mm であり、ネットの格子幅は、縦・横共に約 4.0 mm である。このようなネットを用いて粒子群を一体化することにより、初期の粒子間の摩擦や噛み合わせと、運動時の粒子の間隙への水の浸入条件とをネットで包まない粒子群に近付ける。粒子は、ガラス球(小)とし、次の4ケースを対象とした。

Case 1: 上層粒子塊の質量を約 0.5 kg とし、下層粒子群の質量を約 2.5 kg とする。

Case 2: 上層粒子塊の質量を約 1.0 kg とし、下層粒

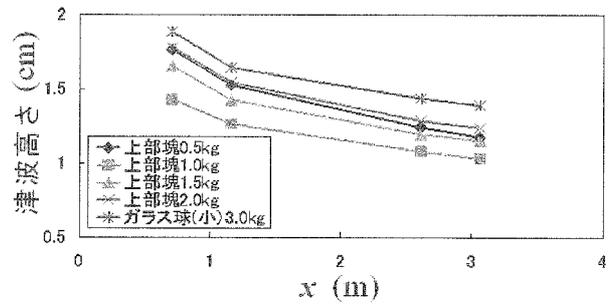


図-11 ガラス球(小)の場合の上層塊の質量と津波高さの関係 ($h = 14.0 \text{ cm}$, $\beta = 60^\circ$, $W = 3.0 \text{ kg}$)

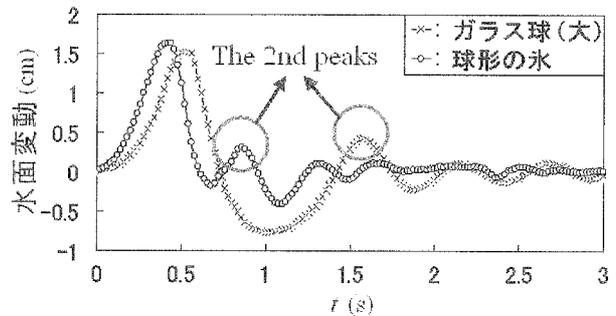


図-12 ガラス球(大)及び球形の氷の場合の波高計3の設置位置における水面変動 ($h = 14.0 \text{ cm}$, $\beta = 45^\circ$, $W = 2.0 \text{ kg}$)

子群の質量を約 2.0 kg とする。

Case 3: 上層粒子塊及び下層粒子群の質量をともに約 1.5 kg とする。

Case 4: 上層粒子塊の質量を約 2.0 kg とし、下層粒子群の質量を約 1.0 kg とする。

斜面より沖側の水平床上の静水深 $h = 14.0 \text{ cm}$ 、斜面勾配 $\beta = 60^\circ$ の場合の各ケースにおける津波高さを図-11 に示す。上層粒子塊の質量が $1.0 \sim 2.0 \text{ kg}$ の場合、上層粒子塊の質量が大きいほど、生成される津波の津波高さが大きくなる。しかしながら、上層粒子塊の質量が 0.5 kg になると、上層粒子塊の質量が 1.5 kg の場合よりも津波高さが大きくなる。上層が粒子塊とならず、粒子群のみが落下する場合の方が、上層が粒子塊となって落下する場合よりも、津波高さが大きくなる。

9. 氷の崩落による津波の生成

比重が水より軽い氷を用いた実験を行なった。各ケースにおいて、粒子群、または、氷塊の全質量を約 2.0 kg に揃えて実験を行なった。斜面より沖側の水平床上の静水深を $h = 14.0 \text{ cm}$ とし、斜面勾配を $\beta = 45^\circ$ に設定した。

波高計3の設置位置における水面変動の実験結果を図-12 に示す。ここで、粒径約 28.9 mm のガラス球と、粒径約 29.0 mm の球形の氷により生成され

る津波が比較されている。前者のガラス球の場合、津波の第1波のピークが現れてから約1.1 s後に、第2波のピークが現れているが、この第2波は、粒子群の突入に起因して生成した岸向きの波が、斜面で反射し、その後、波高計まで伝達したものである。これに対して後者の氷の場合、周期0.5 s程度の振動が発生しているが、これは、水中に潜った氷が浮上したことに起因するものである。

また、各ケースにおける津波高さを図-13に示す。幅約20.0 cm、質量約2.0 kgの直角二等辺三角柱状の氷塊により生成される津波の津波高さは、津波の生成直後、同質量の球形の氷群により生成される津波よりも大きい、その後の減衰率が大きく、波高計3の設置位置では、球形の氷群による津波とあまり変わらなくなっている。波高計3の設置位置では、この氷塊や、球形の氷群により生成された津波の津波高さが、同質量のガラス球(大)の粒子群により生成された津波よりもやや大きい。このように、水面下に深く潜行しない氷の崩落によっても、大きな津波が発生し得る。

10. 結 論

様々な粒径や形状を有する粒子群、または、粒子塊の崩落により誘起される津波の水理実験を行なった。得られた主要な結論は、以下の通りである。

- 1) 斜面勾配が緩やかな場合、下部の粒子が先行して落下し、粒径が大きいほど津波高さが大きくなる。斜面勾配が急な場合、鉛直落下に近い落下形態を示し、津波高さが粒径にあまり依存しない。
- 2) 静水深が浅く、粒子群の沖向きの移動が津波の成長に寄与する場合、津波高さが大きくなる。
- 3) 比重が1より大きい粒子群の水中突入時に生成した岸向きの波が斜面で反射し、波高の比較的低い津波第2波となる。
- 4) 粒子の噛み合わせが強固である場合、津波の周期が長くなり、津波高さが低くなる。
- 5) 崩落体の上層が一体となって落下するとき、上層塊の質量が、ある値以上の場合、上層塊の質量が重いほど津波高さが大きくなるが、その値以下の場合、上層塊の質量が軽いほど津波高さが大きくなる。

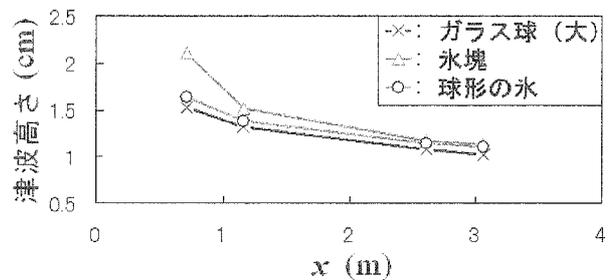


図-13 ガラス球(大)、氷塊及び球形の氷の場合の津波高さ ($h = 14.0$ cm, $\beta = 45^\circ$, $W = 2.0$ kg)

- 6) 深く潜行しない氷の崩落も津波高さを大きくし得る。氷の浮上に伴い、周期の短い水面変動が発生する。

本研究に関する今後の課題として、以下の点を挙げる。

- ・崩落粒子の運動のメカニズムを考慮して、実現象の津波生成過程の解明を目指す。
- ・本実験結果の現地スケールに対する適用性を考察する。また、現地スケールへの適用を目的とした数値解析モデルを作成する。

参考文献

- 1) 富樫宏由, 平山康志, 谷口祐治, 松本慎市: 1792年有明海津波の再現性水理実験, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 221-225, 1992.
- 2) ロイター: アンデス山中の湖に氷河崩落, 高さ23mの津波発生, <http://jp.reuters.com/article/worldNews/idJPJAPAN-14786620100413?rpc=165>.
- 3) Kanamori, H. and Kikuchi, M.: The 1992 Nicaragua earthquake: A slow tsunami earthquakes associated with subducted sediments, Nature, Vol. 361, pp. 714-716, 1993.
- 4) 柿沼太郎: 津波地震がもたらす幾つかの地変形態を対象とした津波形成過程の数値解析, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 191-195, 2006.
- 5) 今村文彦, 後藤大地, 嶋原良典, 喜多村雄一, 松原隆之, 高岡一章, 伴一彦: 土砂突入による津波発生機構に関する基礎検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 321-325, 2001.
- 6) 重松孝昌, 河野哲也: 斜面上を運動する粒子群に誘起される流体運動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 136-140, 2006.
- 7) 柿沼太郎, 浅野敏之, 中村和夫, 劉魯安: 地滑りによる津波の生成に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 346-350, 2008.