

地滑り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

柿沼太郎¹・浅野敏之²・中村和夫³・劉 魯安⁴

Taro KAKINUMA, Toshiyuki ASANO, Kazuo NAKAMURA and Luan LIU

Hydraulic experiments were performed to simulate tsunami generation due to landslides, which consist of particles including glass balls, glass beads, natural rocks, acrylic rocks, and block ices, 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. The period of tsunamis due to glass-bead motion is longer than that due to glass-ball motion. On a mild slope, tsunami profiles depend on the diameter of the sliding glass balls. In shallow water, the slide distance of particles is shorter, the tsunami height becomes lower. The block ices can also generate large tsunamis, although the ice does not go deep under the water.

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・被害共に大きくなる可能性が高い。眉山の山体崩壊により発生した1792年有明海津波は、有明海を伝播し、対岸の肥後・天草において、約1万人もの津波による死者を出した(富樫ら, 1992)。

また、2007年8月には、ノルウェー北部のSvalbard諸島沿岸で、氷河崩落に伴い津波が発生し、付近を通航中の遊覧船の乗客ら18人が重軽傷を負った。氷河の崩落による津波の発生は、地球温暖化の影響によって、今後、頻度が増すことが危惧される。

こうした、土砂等の崩落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(Kanamori・Kikuchi, 1993)。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た地滑りに伴い、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となって、大規模な被害をもたらす可能性があるからである。例えば、1771年八重山津波では、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。

地滑りは、津波地震の分類(柿沼, 2006)によると、「流体と相互干渉する地変」の一種である。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、崩落体を構成する剛体、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ため、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(2001)や重松・河野(2006)等による研究に限られている。そして、例えば、後者では、斜面上を運動する粒子群が誘起する流体運動の実験が行なわれたが、対象粒子が同一粒径のガラスビーズのみであったため、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。

そこで、本研究では、様々な粒径の球状粒子及びブロック状粒子を用いて、斜面勾配を変化させて水理実験を実施し、崩落する粒子群と、それらに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に示すような、長さ2 m、幅0.2 m、高さ0.27 mの、津波生成実験のための水槽を製作した。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、堰き止められていた粒子群が崩落し、津波が生成される。2 mm厚の鋼板製のゲートには、図-2のように左右に伸びる2本のレバーがヒンジを介して連結されている。これらのレバーは、左右同時に手動で勢いよく操作することができる。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、ウレタンが貼ってあり、ゲート停止時の衝撃が吸収され、実験水槽は、殆ど振動しない。こうした左右同時に操作される2本のレバーとスリットにより、左右・前後にぶれることのない、速やかなゲートの上昇が実現された。その結果、崩落粒子は、

1 正 会 員 博(工)	鹿児島大学准教授 工学部海洋土木工学科
2 正 会 員 工博	鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
3	鹿児島大学 工学部技術部
4	鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻

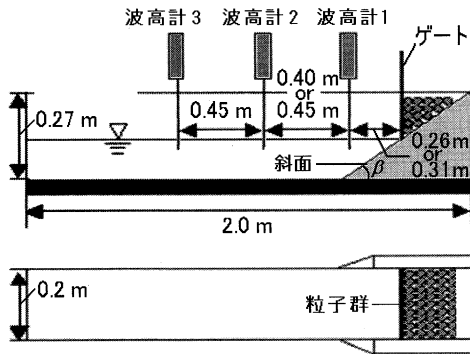


図-1 津波生成実験水槽の概略図（上図及び下図は、それぞれ、側方及び鉛直上方から見た図である。）

積載時の高さによらず、ほぼ同時にゲートからの拘束力から解放される。

鉛直ゲートの下端は、最下降時に水路底面から14.0 cmの高さにある。このときのゲート下端に接するように、水槽内に斜面を設置する。斜面は、取り替え可能であり、斜面勾配や斜面形状、そして、斜面粗度を変えることができる。本論文の実験では、滑面に研磨されたアクリル板を斜面として用いた。

3. 実験の方法

本論文の実験では、図-2のゲートを鉛直方向に設置し、崩落粒子の沖側面を鉛直面とした。斜面勾配は、一様とし、その勾配 β を 60° 、または、 30° の二通りとした。一様静水深 h は、9.0、14.0、または、24.0 cmとした。

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

1) 球状粒子は、図-3のような、粒径28.9、19.8及び11.6 mmの大・中・小3種類のガラス球と、粒径0.7~1.2 mmで平均径約1.0 mmのガラスビーズである。比重は、いずれの球状粒子も約2.6である。

2) ロック状粒子は、自然石、アクリルロック及びアイスブロックである。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。また、アイスブロックは、一辺が約23.0 mmの、立方体状に水道水を凍らせた水である。

3) 粒子塊は、1) 球状粒子の1種である、粒径11.6 mm、比重約2.6のガラス球（これをガラス球（小）と表記する。）の複数個をビニール製のネットで包んでまとめたものである。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

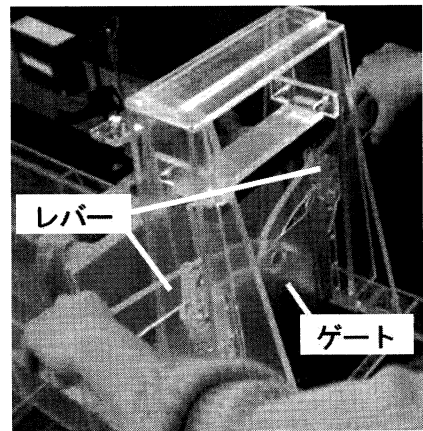


図-2 ゲートとゲートに連結されたレバー

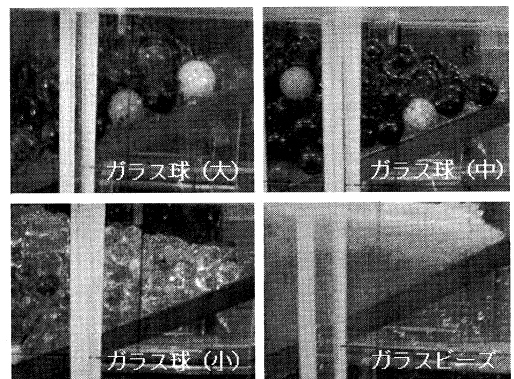


図-3 球状粒子を用いた実験における各粒子群の積載途中の状況（ガラス球の実験では、粒子の運動を観察するため、赤色、黄色及び青色に着色した3個のガラス球を側方の壁面に沿って配置してある。この後、更に粒子を積み重ね、上面を水平に均す。）

mm である。

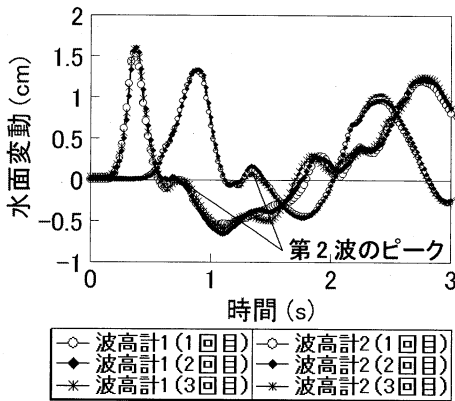
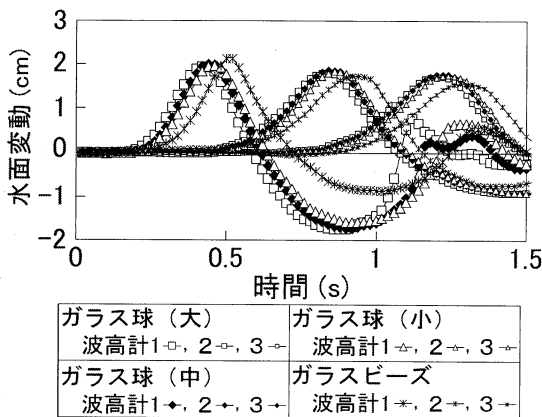
図-1に示す3箇所に設置した波高計1~3により水面変動を測定した。ゲート~波高計1~波高計2~波高計3の設置間隔は、球状粒子及びロック状粒子を用いた実験では、それぞれ、0.26、0.45及び0.45 mとし、粒子塊を用いた実験では、それぞれ、0.31、0.40及び0.45 mとした。また、2台のデジタルビデオカメラを用いて、粒子群の水中への突入状況及び水中での運動の様子と、生成された津波の水面波形を撮影した。

4. 球状粒子を用いた実験の結果

(1) 水面の時間波形の比較

静水深を $h=14.0$ cmとする。各ケースにおいて、粒子群の全質量を約3.0 kgに揃えて実験を行なった。

斜面勾配 $\beta=60^\circ$ の場合にガラス球（小）を用いて実施した3回の実験の結果を図-4に示す。2.で述べたよう

図-4 津波の時間波形 ($h=14.0$ cm, $\beta=60^\circ$)図-5 津波の時間波形 ($h=14.0$ cm, $\beta=60^\circ$)

に、ゲートを瞬時に引き上げる機構を工夫したため、水面変動の再現性がよい。なお、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。

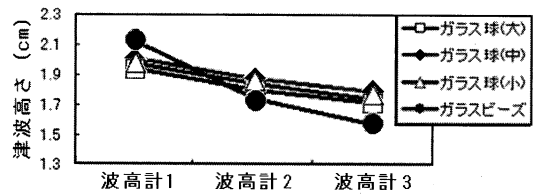
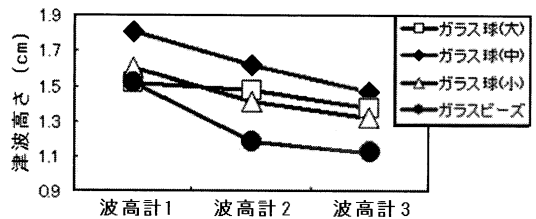
図-5に、斜面勾配 $\beta=60^\circ$ の場合の水面変動を示す。この場合、ガラス球の径による違いが殆ど現れていないが、斜面勾配がより緩やかな場合には、4. (2)で述べるように、ガラス球の粒径による津波波形の違いが見られた。

また、いずれの斜面勾配の場合にも、図-5のように、ガラスビーズにより生成される津波の時間波形が、ガラス球により生成される津波の時間波形よりも伸張し、周期が長くなる。

(2) 津波高さの比較

静水深を $h=14.0$ cm とする。各ケースにおいて、粒子群の全質量を約 3.0 kg に揃えて実験を行なった。

斜面勾配 $\beta=60^\circ$ 及び 30° の場合の津波高さをそれぞれ図-6(a)及び(b)に示す。ここで、津波高さとは、各

(a) 斜面勾配 $\beta=60^\circ$ (b) 斜面勾配 $\beta=30^\circ$ 図-6 波高計設置位置における津波高さ ($h=14.0$ cm)

地点において水面変動が示す最大値である。

静水深 $\beta=60^\circ$ の場合、ガラスビーズにより生成される津波の津波高さは、波高計1の地点において、ガラス球により生成される津波よりも高いが、波高計2及び3の両地点において、ガラス球により生成される津波よりも低い。すなわち、波高計1～波高計2間で、ガラスビーズにより生成される津波の津波高さの減衰率が、ガラス球により生成される津波より大きくなっており、ガラスビーズにより生成される津波の分散性が、ガラス球により生成される津波より大きいことがわかる。

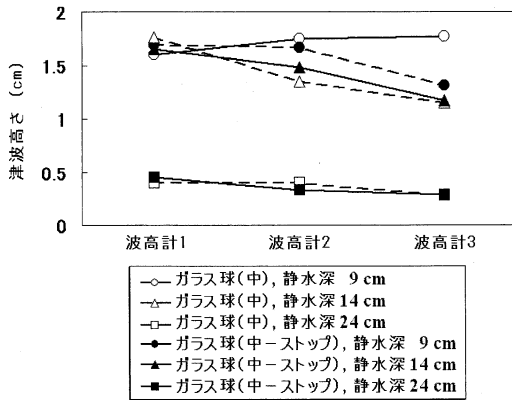
斜面勾配が緩やかな $\beta=30^\circ$ の場合には、 $\beta=60^\circ$ の場合よりも、ガラス球の粒径による津波高さの違いが大きく現れる。崩落過程において、 $\beta=60^\circ$ の場合には、上部に積載されたガラス球が先行して水面に突入する。逆に、 $\beta=30^\circ$ の場合には、下部に積載されたガラス球が先行して水面に突入する。前者では、各粒子の崩落が鉛直落下に比較的近くなり、津波波形が粒子の径に依存しにくくなるのである。なお、各波高計の設置位置において、球状粒子により生成される津波の津波高さは、 $\beta=60^\circ$ の場合が $\beta=30^\circ$ の場合よりも高くなっている。

また、いずれの斜面勾配の場合でも、波高計3の位置における津波高さは、ガラス球(中)により生成される津波が最も高い。そして、他の球状粒子により生成される津波との津波高さの差は、 $\beta=30^\circ$ の場合に大きくなる。波高計3の位置における津波高さは、ガラスビーズにより生成される津波が最も低くなっている。

(3) 水深及び粒子群の滑動距離の影響

各ケースにおいて、粒子群の全質量を約 3.0 kg に揃えて実験を行なった。

静水深が $h=9.0$, 14.0 , または、 24.0 cm で、斜面勾配が $\beta=60^\circ$ である場合の、ガラス球(中)により生成

図-7 波高計設置位置における津波高さ ($\beta = 60^\circ$)

される津波の津波高さを図-7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。

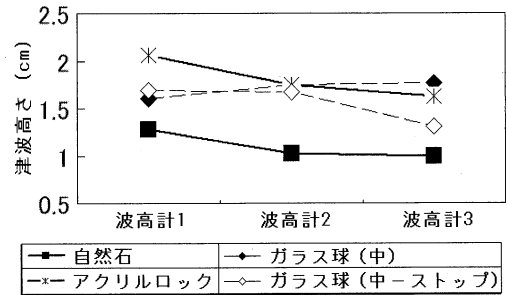
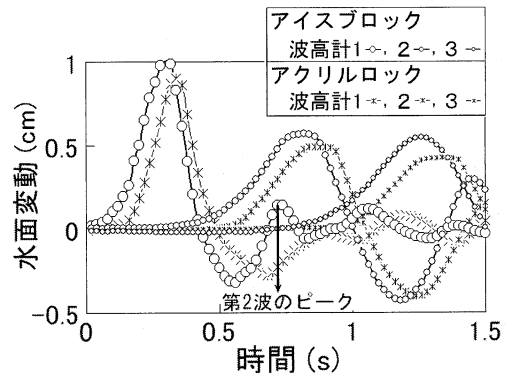
静水深 $h=9.0$ cm の場合の、ガラス球 (中) により生成された津波の津波高さは、波高計2の設置位置よりも、波高計3の設置位置における方が大きくなっている。これは、水深が比較的浅く、水平な水路床上を沖向きに移動する粒子群が、津波の成長に寄与する効果が大いからである。他方、ストップを設置した「ガラス球 (中ストップ)」の場合には、津波があまり成長せず、波高計3の設置位置における津波高さが、波高計2の設置位置よりも低くなっている。崩落粒子の滑動距離は、崩落粒子の粘着力と噛み合わせに依存すると考えられ、特に、水深が浅い場合、津波高さの違いに影響を及ぼすであろう。波高計3の設置位置における津波高さは、静水深 $h=14.0$ 及び 24.0 cm のときには、静水深 $h=9$ cm のとき程ストップの存在の影響を受けない。

5. ロック状粒子を用いた実験の結果

ロック状粒子を用いた実験では、球状粒子を用いた実験程の再現性が得られないため、ケース毎に最低3回の実験を行なった。ここでは、代表的なケースの結果を示す。より厳密な議論のためには、多数回の実験結果をエラーバー付きで示すといった必要があるが、これは、今後の課題とする。

静水深 $h=9.0$ 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る津波の津波高さを図-8に示す。図-8には、ガラス球 (中) の場合も示してある。各粒子群の全質量は、約 2.0 kg である。

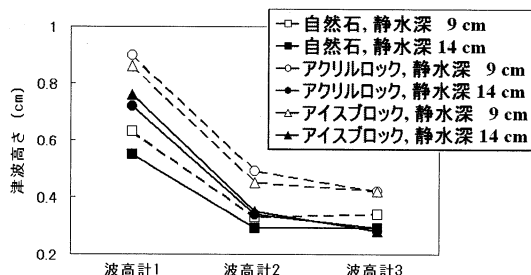
自然石は、粒子同士の噛み合わせが強固であるため、崩落に時間を要し、生成される津波の周期が長くなり、その結果、津波高さが低くなる。アクリルロックは、自然石と類似の形状を有するが、比重が軽く、摩擦力和噛み合わせが弱いため、自然石よりも津波高さが高くなる。

図-8 波高計設置位置における津波高さ ($h=9.0$ cm, $\beta=60^\circ$)図-9 津波の時間波形 ($h=9.0$ cm, $\beta=60^\circ$)

また、 $h=9.0$ cm 及び $\beta=60^\circ$ である場合の、アクリルロック、または、アイスブロックにより生成される津波の時間波形を図-9に示す。両者共に、粒子群の全質量は、約 0.5 kg である。時刻 0.7 s で現れる第2波のピークは、潜水したアイスブロックの浮上に起因し、これは、アクリルロックにより生成される津波に見られない。なお、ここで用いたアイスブロックは、アクリルロックと粒径及び形状が異なっている点に注意する必要がある。

静水深 $h=9.0$ 、または、 14.0 cm で、斜面勾配 $\beta=60^\circ$ である場合の、自然石、アクリルロック、または、アイスブロックにより生成される津波の津波高さを図-10に示す。いずれの粒子群も、全質量は、約 0.5 kg である。

波高計3の設置位置における津波高さは、 $h=9.0$ cm の場合、自然石により生成される津波が低い、 $h=14.0$ cm の場合、3者間に殆ど差異がない。また、津波が波高計1の設置位置から波高計2の設置位置に至るまでの津波高さの減衰率は、いずれの静水深の場合も、アイスブロックにより生成される津波が最大となり、この現象は、 $h=14.0$ cm の場合に顕著である。なお、アイスブロックは、比較的低密度であるため、水中への突入後に降下速度が急減し、第1波のピークが伝播した後、水面に浮上した。

図-10 波高計設置位置における津波高さ ($\beta=60^\circ$)

6. 粒子塊を用いた実験の結果

地滑りでは、崩落体の一部が一体となって、比較的大きな塊として降下する可能性がある。そこで、 $h=14.0$ cm 及び $\beta=60^\circ$ として、次の5ケースを設定した。

Case 1：崩落体のすべてが粒子群で構成されている。

Case 2：崩落体の上部が一体となっており、下部が粒子群で構成されている。

Case 3：崩落体の下部が一体となっており、上部が粒子群で構成されている。

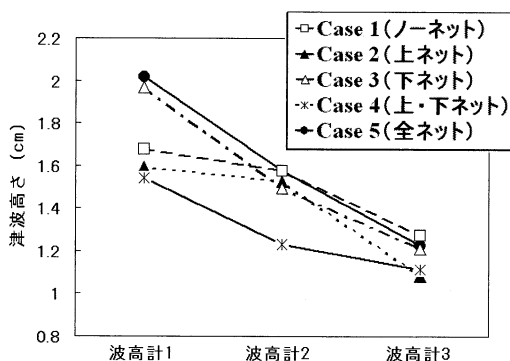
Case 4：崩落体の上部と下部のそれぞれが一体となっている。

Case 5：崩落体のすべてが一体となっている。

粒子をガラス球 (小) とし、各場合で、その総質量を約 2.6 kg とする。一体となる部分のガラス球をネットで包み、その質量を約 1.3 kg とする。Case 5では、すべてのガラス球をネットで包む。積載状況は、4. の実験と同様とする。なお、一体化には、ビニールネットを用いて、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粒子塊がない場合に近付ける。

本実験では、次のような崩落状況が観察された。Case 2では、下部のガラス球の半分程度が先行し、残りが粒子塊を上に乗せた状態で降下し、停止後もこの位置関係にあった。Case 3では、初めは、上部と下部が一体となって降下するが、次第に上部のガラス球の半分程度が下部よりも前に移動し、下部の沖側面に沿って落下する。停止後は、下部の沖、上及び岸側にガラス球がある。Case 4では、上部と下部にずれが生じないが、下部のみが沖側に膨らむ。Case 5では、ネットで包まれた粒子塊の形状が、降下時及び降下後とも、殆ど変化しなかった。

Case 1～5における津波高さを図-11に示す。波高計1の設置位置における津波高さは、初期の運動が類似したCase 3とCase 5で高い。Case 2で、下部のガラス球の半分程度が先行するため、波高計1及び波高計3の設置位置の津波高さが低い。Case 4では、波高計1～3の設置位置の津波高さがいずれも低い。

図-11 波高計設置位置における津波高さ ($h=14.0$ cm, $\beta=60^\circ$)

7. 結 論

ゲートを瞬時に引き上げることができる機構を有する津波発生水槽を製作し、粒径や形状の異なる粒子群及び粒子塊の崩落に誘起される津波の水利実験を行なった。その結果、生成される津波に次のような特性のあることがわかった。すなわち、1) ガラスビーズによる津波は、ガラス球の場合よりも周期が長く、分散性が大きく現れる；2) 緩やかな斜面上では、下部の粒子が先行して降下し、津波波形が粒径に大きく依存する；3) 水深が浅い場合、粒子の滑动距離が短いと、津波高さが低くなる；4) 粒子の噛み合わせが強固な場合、津波の周期が長く、波高が低くなる；5) 崩落体の上部が一体となっている場合、津波高さが低くなる傾向がある；6) 水面下に深く潜行しない水の崩落によっても、大きな津波が発生し得る。

今後は、ゲートを傾斜させた場合や、土砂といった、ガラス球やガラスビーズと異なる粒子を用いた場合について実験を行ない、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したい。

参 考 文 献

- 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(2001)：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。
- 柿沼太郎(2006)：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。
- 重松孝昌・河野哲也(2006)：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。
- 富樫宏由・平山康志・谷口祐治・松本慎市(1992)：1792 年有明海津波の再現性水利実験，海岸工学論文集，第39巻，pp. 221-225。
- Kanamori, H. and M. Kikuchi(1993)：The 1992 Nicaragua earthquake：A slow tsunami earthquakes associated with subducted sediments, Nature, Vol. 361, pp. 714-716。