

2004 年インド洋大津波に伴う津波石移動現象 —その実態調査と水理実験に基づく数値モデルの適用範囲の把握—

Field Observation and the Applicability Limit of the Model for Boulder Transport by the
Tsunami(BTT-Model) based on the Hydraulic Experiment

岡田清宏¹・後藤和久²・今村文彦³・篠崎鉄哉⁴

Kiyohiro OKADA, Kazuhisa GOTO, Fumihiko IMAMURA and Tetsuya SHINOZAKI

Sometimes tsunami transports large boulders (tsunami boulders). The movement of tsunami boulders could have directly related to the hydraulic force of tsunami. Our field observations clarified that long axes of boulders at Pakarang Cape, Thailand, which had been transported by the 2004 Indian Ocean tsunami, were likely to be vertical against the tsunami flow direction. Moreover, our hydraulic experiment revealed that boulder movement is affected by their initial long axes orientations, suggesting that shapes and long axes orientations of boulders must be considered in the numerical simulation.

1. はじめに

津波によって巨礫（以下、津波石）が陸上に打ち上げられるという現象が過去に数例報告されている。例えば、沖縄県石垣島には、1771 年明和津波によって移動したと考えられるサンゴ岩からなる巨礫が多数分布している（加藤・木村, 1983）。同様に、津波リスクの高い国の沿岸域に巨礫が分布しているとの報告があり（例えば、Noomets ら, 2004）、これらが津波によって運搬されたことが示されれば、こうした巨礫を用いて過去の津波の情報が得られる可能性がある。しかし、古文書記録が残っている石垣島の例と比べて、他の巨礫群は津波起源を示す証拠が乏しく、真偽不明なものが多い。一方、2004 年インド洋大津波の後に、タイのパカラン岬（図-1）において、海岸から沖合に約 600 m の礁縁付近に位置していた最大直径 4 m（重量約 22 t）のサンゴ岩が、1000 個以上も潮間帯に打ちあがったことが、地質学的調査によって明らかにされた（図-2）（後藤ら, 2006）。

津波石の移動は津波流体力の影響を強く受けるため（野路ら, 1993）、その移動解析を行うことで、津波流体力に関する情報が得られる可能性がある。津波石の移動モデルは、野路ら（1993）によって開発され、今村ら（2001）や大窪ら（2004）が改良を重ね、現在では移動形態（滑り移動（滑動）、回転移動（転動）、跳ねによる移動（跳躍））を考慮した数値計算が可能になっている。しかし、このモデルにはさらに以下の検討・改良を行う必要があると考えられる。1) 既往モデルの適用範囲の

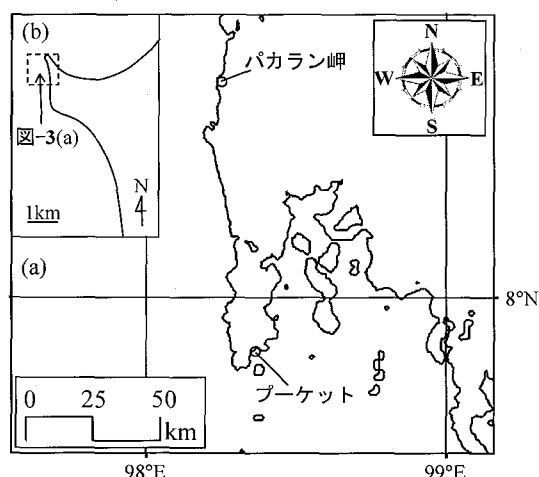


図-1 タイ南部・パカラン岬 ((a) タイ南部, (b) パカラン岬の拡大図)

把握。2) 多様な形状の津波石を想定したモデルの改良。3) より実地形に近い水理実験に基づくモデルの検証。4) 複数の津波石の移動を再現できるモデルの開発。その中でも、既往の数値モデルを用いる際に生じる誤差の発生条件や、モデルの適用範囲を特定することがまず重要であると考えられる。特に、津波衝突時の津波石の初期の長軸の向きによって、その移動距離が変化することが大窪ら（2004）により定性的に指摘されているが、どのような条件で変化が生じるのか明確でない。そこで本研究では、タイ・パカラン岬における実態調査を踏まえた水理・数値実験を行うことにより、津波石の特性やそこから推定できる情報、数値モデルの適用範囲を検討した。

1 学生会員 東北大学 大学院工学研究科
2 博(理) 東北大学助教 大学院工学研究科
3 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科
4 東北大学 理学部

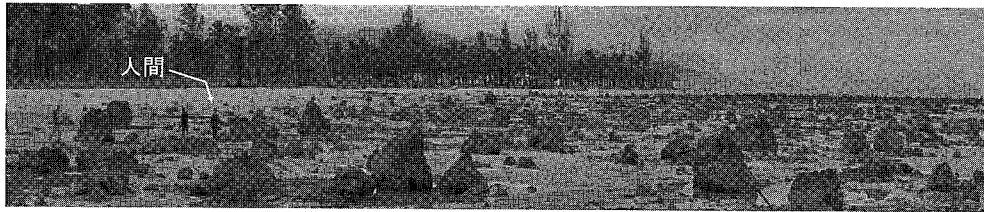


図-2 タイ・パカラン岬に分布する、数メートル大の巨礫（津波石）群

2. 津波石の実態調査

タイ・パカラン岬における津波石の形状や分布の把握には、後藤ら（2006）が寸法や位置、長軸の向きを調査したデータ（計 462 個の津波石）を用いた。後藤ら（2006）によれば、津波石に付着する生物（石灰藻、フジボなど）やサンゴの生息条件から、津波石は礁縁付近を起源としていることが分かった（図-3(a)）。さらに、我々は 2006 年 11 月に現地で追加調査を行い、密度測定と水理実験用の試料採取を行った。一連の調査の結果、津波石の形状は直方体や楕円体に近似できるものが多いこと、長軸／短軸比は平均 1.3（図-4）、密度は約 $1.27 \sim 1.62 \text{ g/cm}^3$ であることがわかった。また、長軸の向きは主に海岸線に平行で（図-3(b)）、推定される津波の流向に対してほぼ直交している。このことと丸みを帯びた形状であることから、津波石は長軸を回転軸として、転動や跳躍によって移動したと推定される（後藤ら、2007）。

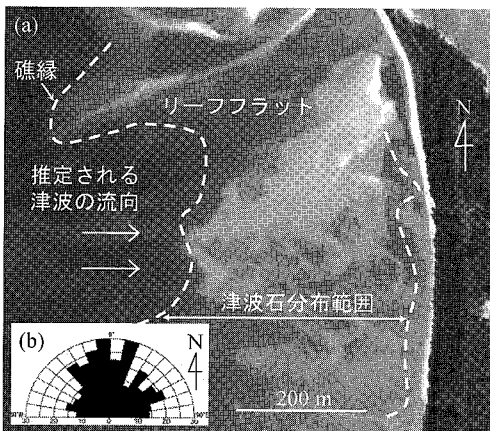


図-3 (a)パカラン岬の津波石の分布範囲。西側の曲線は礁縁を示す。(b)津波石の長軸の向き（測定数：462 個）。半円は 10° 刻みで、鉛直方向が南北、右側が東方向を示す。

3. 津波石の移動実験

本実験では、全長 15 m の一次元水路（図-5）に設置

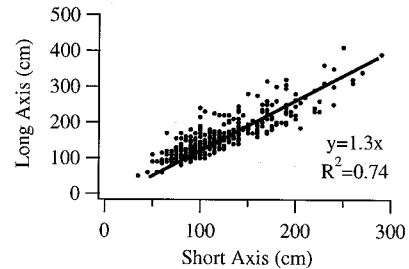


図-4 パカラン岬の津波石の長軸と短軸の比（平均 1.3）

した貯水タンクの空気圧式ゲートを急開し、津波を想定した段波を 1 波のみ発生させ、水路下流端に設置した傾斜 $1:10$ の斜面を遡上させた。また、砂礫質の浅瀬を想定し、斜面の表面に豊浦標準砂を貼付けた。

津波石を想定したブロックは、密度の異なる砂岩（密度： 2.40 g/cm^3 ）とサンゴ岩（密度： 1.27 g/cm^3 ）を材質として、立方体（ $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$ ）、および直方体（ $2 \times 2 \times 3 \text{ cm}$ 、 $2 \times 2 \times 4 \text{ cm}$ 、 $2 \times 2 \times 6 \text{ cm}$ ）に成形した（表-1）。ブロックの初期位置は斜面下端、初期位置での長軸の向きは 0° （図-6(b)）とし、段波による移動距離を計測した。 $2 \times 2 \times 4 \text{ cm}$ のブロックについては、長軸を段波の入射方向に対して 0° 、 45° 、 90° の方向に置き、初期位置での長軸の向きの違いによる移動形態と距離の変化を観察した。また、水路に設置した流速計によって段波の最大流速を計測し、段波の規模を表す指標とした。以上の実験条件を表-2 に示す。

また、タイ・パカラン岬と実験条件を比較するために、ブロックの移動しやすさを表す無次元量 Ψ （式(1)）を用いる。

$$\Psi = \frac{C_D \rho_f U_{max}^2}{2(\rho_s - \rho_f)gd} \dots \dots \dots (1)$$

無次元量 Ψ は、土砂移動現象の解析に用いられる Shields 数を参考にして、ブロックに作用する抗力 F_D による回転モーメントと、ブロック重量 W による抵抗モーメントの比から導出した。ここで、抗力係数 C_D は、大窪ら（2004）の津波石移動計算において良好な結果を

表-1 ブロックの詳細

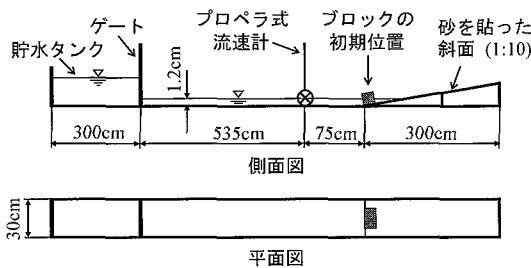
材 質	密 度 (g/cm^3)	静止摩擦 係 数	動摩擦 係 数
サンゴ岩	1.27	1.05	0.68
砂 岩	2.40	0.75	0.54

表-2 ブロックの形状と段波の作用条件

形状 (cm^3)	長軸の向き	最大流速 (cm/s)
$2 \times 2 \times 2$	$0^\circ (\cdot 90^\circ)$	70 ~ 150
$2 \times 2 \times 2.5$	0°	90 ~ 120
$2 \times 2 \times 3$	0°	90 ~ 120
$2 \times 2 \times 4$	$0^\circ \cdot 45^\circ \cdot 90^\circ$	90 ~ 150
$2 \times 2 \times 6$	0°	90 ~ 150

表-3 無次元量(抗力/ブロック重量)による, 実験とパカラン岬の比較. 括弧内は砂岩ブロックの値を示す.

条 件	最大流速 (cm/s)	短軸長 (cm)	無次元量 ϕ
パカラン岬	1500 ~ 800	200	2.8 ~ 9.7
水理実験	138 ~ 69	2.0	4.7 ~ 20.6 (1.5 ~ 3.6)

図-5 実験装置(直方体ブロックの長軸が、段波の入射方向に対して 90° 方向となるように置いた場合)

得た, 立方体ブロックに用いられる一般的な C_D 値 ($=1.05$) である。また, ρ_f は流体の密度, U_{max} は流速測定位置における段波の最大流速, ρ_s はブロックの密度, g は重力加速度, d はブロックの短軸の長さである。ブロックの短軸を代表長さとしたのは, 転動・跳躍時における回転半径になるためである。

タイ・パカラン岬と実験条件を無次元量 Ψ で比較すると, 表-3 のようになる。よって, 本実験の段波とブロックの関係は, パカラン岬の津波石と津波来襲時の条件を近似するものと考えられる。

(1) ブロックの移動結果

次に, ブロックの初期位置での長軸の向きの違いに伴う, 移動形態の変化について述べる。本実験のように, 砂を貼付けた凹凸のある斜面上では, 入射方向に対して長軸を 90° , 45° の向きに置いた砂岩・サンゴ岩ブロック ($2 \times 2 \times 4 \text{ cm}$) は, 段波が衝突しても長軸の向きを変えず (図-6(a)), 主に跳躍によって移動を開始した (図-7(a))。一方, 段波の入射方向に対して長軸を 0° に

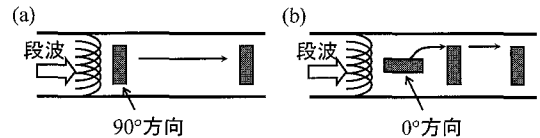
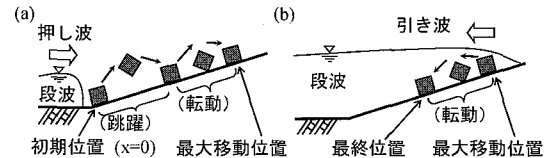
図-6 直方体ブロックの長軸を段波の入射方向に(a) 90° , および(b) 0° に置いた場合のブロックの挙動の違い

図-7 (a)押し波時, ブロックは主に跳躍・転動し, (b)引き波時は, 主に転動によって移動する。

置いた場合は, 入射方向に対して長軸の向きを 90° に変えてから跳躍した (図-6(b))。ただし, 長軸/短軸比が小さい直方体ブロックほど, 立方体ブロックの移動形態と同様に, 向きを変えずに跳躍移動を開始する傾向が見られた。

全てのブロックは, 段波の流速が弱まるにつれて, 段波入射方向に対して長軸が 90° の向きの状態で主に転動し, 最大移動位置に到達する。そして, 軸の方向を変化させずに, 段波の戻り流れによって斜面を滑動・転動形態で下り, 最終位置で停止する (図-7(b))。

図-8, 図-9 に両軸を無次元化した, 砂岩とサンゴ岩ブロックの移動距離をプロットしたグラフを示す。両図の縦軸には, ブロックの短軸の長さ l と最大移動位置の比 (ブロックのサイズと移動距離の関係を表す), 横軸にはブロックに作用する抗力とブロック重量の比 Ψ (式(1), ブロックの移動しやすさを表す) を用いた。

図-8 から, 長軸/短軸比が1.5以下のサンゴ岩と砂岩ブロックの長軸の向きを, 段波の入射方向に対して 0° に置いた場合, 直方体ブロックの移動距離が立方体ブロックの移動距離と, ほぼ等しくなることがわかる。一方, 長軸/短軸比が2以上のブロックを 0° に置いた場合, 移動距離が顕著に減少した。また, 直方体ブロック ($2 \times 2 \times 4 \text{ cm}$) の初期位置での向きを変化させた場合, 段波の入射方向に対して 90° , 45° 方向に置いたブロックと比較して, 0° 方向に置いたブロックの移動距離が低減した (図-9)。

(2) ブロックの移動結果に対する考察

段波の入射方向と, ブロックの長軸の方向転換の関係を考察する。まず, 段波衝突直後にブロックが高速で移動する際, 右城ら (1997) が斜面を落下する落石の運動について指摘しているように, ブロックに生じる遠心力や, 実験斜面の凹凸によるブロックの飛び出しによって,

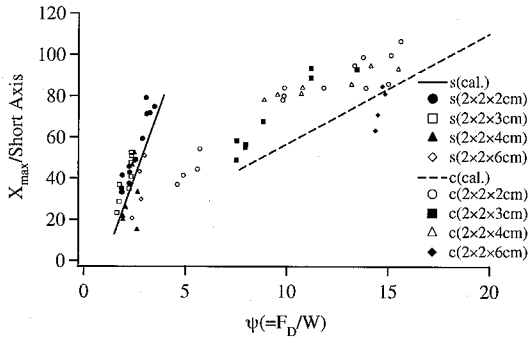


図-8 ブロックのサイズによる移動距離の変化。ブロックの初期の向きは全て 0° である。(ψ:ブロックの移動しやすさ, F_D :抗力, W :ブロック重量, X_{max} :ブロックの最大移動位置, s:砂岩, c:サンゴ岩, cal.:計算値)

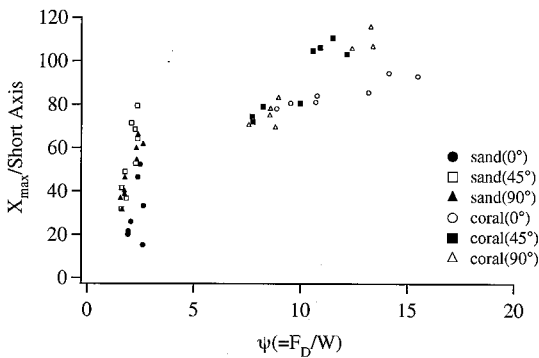


図-9 直方体ブロック(2×2×4cm)の長軸の初期方向による移動距離の変化

ブロックの移動形態が転動・跳躍になりやすいと考えられる(大窪ら, 2004)。その際、段波に対するブロックの投影面積が最大となるように、つまり長軸を回転軸にして移動するとき、ブロックが最も移動しやすいと考えられることから、段波衝突後にブロックは、長軸の向きを主に 90° にして移動したと推察される。一方、引き波時は段波の流体力が小さく、ブロックの移動速度に伴う遠心力が低下するため、ブロックの移動形態は主に滑動・転動になるものと考えられる。

図-8 から、 0° に置いた長軸/短軸比が2以上の直方体ブロックが段波の衝突によって移動する場合、長軸の向きを変えてから移動を開始する影響で移動距離が低減している。一方、長軸/短軸比が1.5以下のブロックは、初期の長軸の向きの影響が小さいため、移動距離は立方体ブロックに近い値になる。したがって、同比が1.5以下の津波石の移動距離を数値計算する際に、段波衝突時の長軸の向きによる方向転換の影響を無視できると考えられる。

例えば、パカラン岬の平均的な津波石は、長軸/短軸比が1.3であることから、その移動の検討には、初期位置での長軸の向きを考慮しなくて良いと判断できる。

4. 津波石移動モデルを用いた実験結果の再現

大窪ら(2004)が開発した数値モデルは、本実験と異なる斜面材質(ブロックとの間で強い摩擦力を発生する布)および、ブロックの密度(1.79および2.71 g/cm³)において再現性が検討されている。そのため、その他の条件においてモデルが適用できるか明確でない。そこで、大窪ら(2004)の数値モデルを用いて、本実験でのブロックの移動を計算することで、モデルの再現性を検討する。

(1) 計算方法

段波の流れの計算には浅水理論を用いる。底面粗度係数は0.017とし、流れの計算条件は、空間格子間隔を0.01 m、時間格子間隔を0.0005 sとした。さらに、実験と同じ15 mの1次元水路とし、段波の流れを25秒間計算した。初期条件としては、水理実験に合わせて水路平面部分の水位を1.2 cmとし、貯水タンクの水量に相当する水面差を18～32 cmの間で1 cmごとに変化させることで、実験で発生させた段波の最大流速を再現できるように設定した。

実験ブロックの移動計算では、ブロックの運動方程式(2)を用いる。

$$\rho_s V \ddot{X} = F_m - F_b - F_g \quad (2)$$

ここで、 F_m 、 F_b 、 F_g はそれぞれ、ブロックに作用する流体力(式(3))、底面摩擦力(式(4))、重力の斜面方向成分(式(5))を表す。

$$F_m = C_D \frac{1}{2} \rho_f A (U - \dot{X}) |U - \dot{X}| + C_M \rho_f V \dot{U} - (C_M - 1) \rho_f V \ddot{X} \quad (3)$$

$$F_b = \mu (\rho_s - \rho_f) V g \cos \theta \frac{\dot{X}}{|\dot{X}|} \quad (4)$$

$$F_g = (\rho_s - \rho_f) V g \sin \theta \quad (5)$$

V はブロックの体積、 X はブロックの水平方向移動座標、 A は段波の流れに対するブロックの投影面積(長軸を含む面)、 U はブロックの位置での流速、 C_M は付加質量力係数(=1.67)である。ここで、式(4)中の μ (式(6))は、動摩擦係数 μ_0 と、実験により導出された係数 β^2 (式(7))で表される摩擦係数(大窪ら, 2004)であり、ブロックの移動形態に応じて変化する。また、

式(7)中の $\dot{X}$ はブロックの移動速度を表す。以上から、ブロックの移動形態に応じて変化する摩擦係数 μ によって、直方体ブロックの滑動・回転・跳躍を、数値モデルによって再現可能である(大窪ら, 2004)。

$$\mu = \frac{2.2}{\beta^2 + 2.2} \mu_0 \quad (6)$$

$$\beta^2 = \frac{\dot{X}^2}{(1 - \rho_f / \rho_s) g d} \quad (7)$$

以上の数値モデルを用いて、直方体ブロックの移動の再現計算を行った。ただし、このモデルでは、段波の入射方向に対するブロックの投影面積 A を変化させることができない。そのため、モデルの適用は、本研究により段波衝突時の長軸の向きによって移動が変化しないことが確認された、長軸/短軸比が1.5以下のブロックに限定される(第3章参照)。

(2) ブロックの移動計算結果

ブロックの移動計算結果と実験値との比較を行った。その結果、既存モデルでは砂岩の移動が良好に再現されるが、サンゴ岩の移動距離は過小評価になった(図-8)。この原因として、実験で用いたサンゴ岩ブロックは密度(1.27 g/cm^3)が小さく、流れの計算の誤差によって移動距離が変化しやすいことが考えられる。また、サンゴ岩ブロックの場合、実験斜面の凹凸による引っかかりによって、動摩擦係数が過大に測定される影響や、さらに流体に対する比重が小さく跳躍しやすいことが、計算値が過小になった原因として挙げられる。以上の結果から、密度が小さいブロックの移動を検討する場合は、底面の凹凸や跳躍の卓越による移動距離への影響を考慮する必要があると考えられる。

5. 結 論

本研究では、津波石の実態調査と水理実験を行い、数値モデルの適用範囲の検討を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

水理実験から、長軸/短軸比が1.5以下の直方体ブロックは、初期位置での長軸の向きの影響が小さいことが分かった。一方、同比が2以上の直方体ブロックは、初期の向きによって移動距離が顕著に変化した。従って、

同比が2以上の津波石の移動には初期の長軸の向きが大きく影響することが分かった。

長軸/短軸比が1.5以下の砂岩ブロックの移動は、既存モデルで良好に再現された。ただし、密度の小さいサンゴ岩ブロックの移動距離は十分再現されなかった。

既存の津波石移動モデルは、リーフ地形に見られるような、斜面や平面の組合わさった複雑な地形での再現性が検証されていない。今後、リーフ地形における津波石の移動実験を行うことによって、津波石移動モデルの再現性の確認を進める必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(若手研究B：課題番号17740331)ならびに財団法人福武学術文化振興財団からの研究助成金を使用して行われた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 今村文彦・吉田 功・アンドリュウ・ムーア(2001): 沖縄県石垣島における1771年明和大津波と津波石移動の数値解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 346-350.
- 石城 猛・吉田 博・矢野光明・高石 協・八木則男(1997): 斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する考察, 土木学会論文集, 第581号/VI-37, pp. 49-58.
- 大窪慈生・菅原正宏・今村文彦(2004): 水理実験による津波石移動解析手法の改良と石垣島の津波石への適用, 東北地域災害科学研究, 第40巻, pp. 259-264.
- 加藤祐三・木村正昭(1983): 沖縄県石垣島のいわゆる「津波石」の年代と起源, 地質学雑誌, 第89巻, 第8号, pp. 471-474.
- 後藤和久・S. A. Chavanich・今村文彦・P. Kunthasap・松井孝典・箕浦幸治・菅原大助・柳沢英明(2006): 2004年インド洋大津波によって運搬された「津波石」の起源, 月刊地球, 326, pp. 553-557.
- 後藤和久・今村文彦・松井孝典・箕浦幸治・菅原大助・柳沢英明(2007): 津波石分布に基づく2004年インド洋大津波の流動特性, 日本堆積学会2007年例会, pp. 46-47.
- 野路正浩・今村文彦・首藤伸夫(1993): 津波石移動計算法の開発, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 176-180.
- Noomets, R., Crook, K. A. W., Felton, E. A. (2004): Sedimentology of rocky shorelines: 3. hydrodynamics of megaclast emplacement and transport on a shore platform, Oahu, Hawaii, Sedimentary Geology, Vol. 172, pp. 41-65.