

移動特性を考慮した津波石の水理実験と数値解析手法の改良

大窪 慈生・菅原 正宏・今村 文彦*

1. はじめに

津波の浸水深や遡上高さは、津波後の痕跡調査や目撃情報から得ることができるため、関連した研究も多くある。一方で、津波による被害は津波の浸水深や遡上高さよりも流体力や流速に関連していることが示されているが、これらの痕跡データは極めて少なく、数百年以上前に起こった津波に関しては、これらに関する情報はほとんど残されていない。この中で、野路ら¹⁾は津波により移動した岩塊(津波石)に着目し、津波の流体力や流速に関する検討を目的に、その移動を再現する数値モデルを提案している。モデルにより津波石の移動が再現できれば、過去の津波の規模だけでなく、沿岸での挙動を知ることにも可能になる。

数値モデルでは、津波石は滑動により移動すると仮定して一定値の動摩擦係数を用いて、底面摩擦力が求められていた。しかし、実際に津波石を移動させる水理実験は実施されておらず、津波石の滑動、転動等の移動形態は不明である。石垣島の津波石の多くが、角が削れて丸味を持った形状であることから転動により移動した可能性もある²⁾。そこで、本研究では、津波のように遡上して引く流れにより、津波石を想定したブロックを移動させる水理実験を実施し、津波石の移動形態(滑動、転動等)や軌道などの移動特性を調べ、その移動を再現できる数値モデルに改良することを目的とする。さらに、数値モデルを石垣島の津波石に適用し、再現性や地形が石の移動に与える効果についても検討を行う。

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

2. 津波石移動実験

(1) 実験装置及び方法

実験装置には図-1に示す一次元水路を用い、ゲートを急開させて段波を発生させ、斜面を遡上するように設定した。津波石のモデルは表-1に示す条件であり、これらを段波により単体で移動させた。初期水深は15, 20, 25, 30cmの4通りで、想定する津波の規模を変化させた。ブロックは図-2のように、段波の遡上に伴って移動し、一旦停止した後、引き波により戻されて最終位置に停止した。実験は1ケースを5回繰り返し、図-2に示す最大移動位置と最終位置を測定した。また、初期水深が30cmの場合に移動するブ

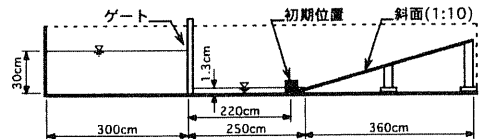


図-1 実験装置

表-1 実験に用いた立方体ブロック

	寸法 (cm)	密度 (g/cm ³)
ブロックA	3.2×3.2×3.2	1.55
ブロックB	1.6×1.6×1.6	1.79
ブロックC	3.2×3.2×3.2	2.71
ブロックD	1.6×1.6×1.6	2.71

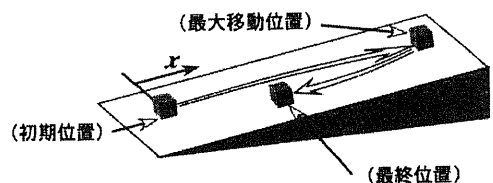


図-2 ブロックの軌道

ロックを水路上方からビデオで撮影した。他に、水路・斜面上で20cmおきに流速を測定し、解析に用いた。

(2) 摩擦係数の修正

水理実験でブロックが転動に近い移動形態で移動することが確認できた。特に、移動速度が大きくなると、ころころ転がるというより、1回転する間に移動する距離が長く、小さな跳躍を繰り返すような移動形態になった。この場合、ブロックと底面の接地時間は短く、ブロックが底面から受ける抵抗も小さくなると考えられる。

掃流砂礫に関する研究で、本モデルと同様の方法で解析が行われ、摩擦係数を粒子速度の関数にすることで良好に計算できることが示されている³⁾。津波石についても移動速度の増加につれて、底面との接地時間は短くなり、摩擦係数を小さくすることで精度が向上すると考えられる。そこで、摩擦係数が時間的に変化するものとして $\mu(t)$ とし、運動方程式を変形した次式から、各時間の $\mu(t)$ を算出した。

$$\mu(t) = \frac{F_m - F_g - \rho_s d^3 \dot{v}}{(\rho_s - \rho_f) d^3 g \cos \theta} \quad \dots (1)$$

ここで、 F_m : 流体力、 F_g : 重力の斜面方向成分、 ρ_s 、 ρ_f : ブロック、水の密度、 d : ブロックの一辺の長さ、 v : ブロックの移動速度である。流体力はMorison式にならぬ次式で求める。

$$F_m = C_D \frac{1}{2} \rho_f (u - v) |u - v| d^2 + C_M \rho_f \dot{u} d^3 - (C_M - 1) \rho_f \dot{v} d^3 \quad \dots (2)$$

ここで、 u はブロックに作用する流速、 C_D 、 C_M は抗力係数、質量力係数で、 $C_D=1.05$ 、 $C_M=1.674$ とする。各時間のブロックの速度、加速度は撮影した映像から求め、ブロックに作用する流速は、実験で測定したものをを用いた。算出した $\mu(t)$ と移動速度の関係は図-3のようになり、次式を得た。

$$\mu(t) / \mu_0 = 2.2 / (\beta^2 + 2.2) \quad \dots (3)$$

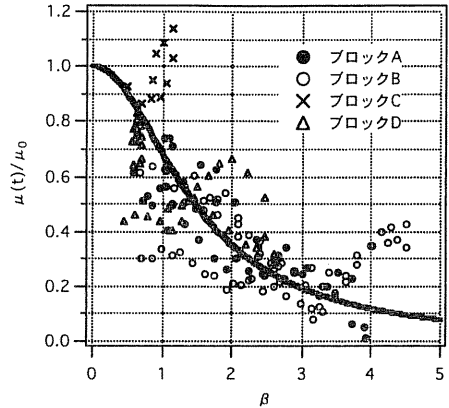


図-3 摩擦係数と移動速度の関係

ここで、 μ_0 : 滑動時の摩擦係数、 β : 津波石の速度に関係したパラメーター ((3) 式) である。

$$\beta^2 = \frac{v^2}{(1 - \rho_f / \rho_s) g d} \quad \dots (4)$$

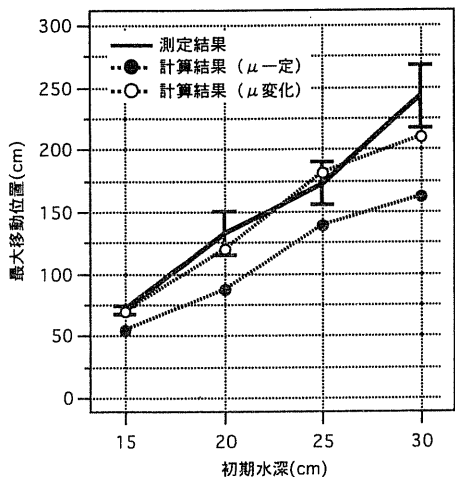
(3) 数値モデルの検証

ブロックAについて、測定結果(5回の平均値)と計算結果を比較したものを図-4に示す。まず、最大移動距離について、滑動時の動摩擦係数で一定とする従来モデルでは、移動距離が過小評価されていることがわかる。一方、摩擦係数を変化させる改良モデルでは良好な結果が得られており、津波の規模の違いによる移動距離の変化もよく再現できている。最終位置についても、改良モデルの方が良好な結果が得られているが、非常にばらつきが大きいケースがある。ブロックの最大移動位置と引き波の分布の微少な変化が関連しており、解析が難しい条件であると思われる。

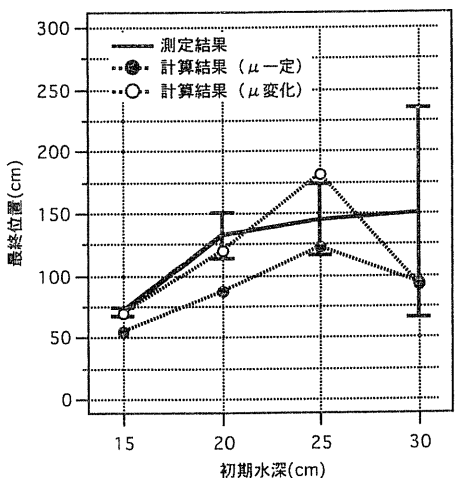
3. 石垣島の津波石の数値解析

(1) 明和津波と適用する津波石

1771年4月24日に発生した明和津波により沖縄県の石垣島などでは多大な被害を受けた。同時に多数の津波石が移動したと報告されている。そこで、明和津波で移動した津波



(a) 最大移動位置



(b) 最終位置

図-4 測定結果と計算結果の比較 (図中バーは標準偏差(±σ)を示す)

表-2 津波石の計算条件

	寸法 (m)	投影面積 (m ²)	密度 (t/m ³)
安良	2.8×2.8×6.2	2.8×6.2	3.3
伊野田	5.2×5.2×6.0	5.2×6.0	1.5
大浜	7.0×7.0×7.0	7.0×7.0	1.5

石に、水理実験で検討を行った、摩擦係数を一定とする従来モデル及び、摩擦係数を変化させる改良モデルを適用して、再現性を検討する。

この津波の数値計算には、吉田⁵⁾の波源モ

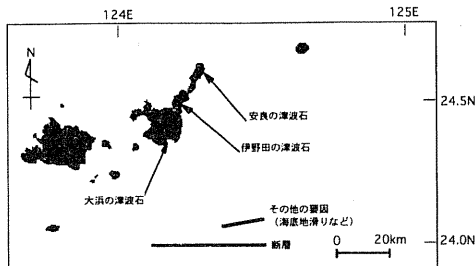


図-5 明和津波の波源と津波石の存在地点

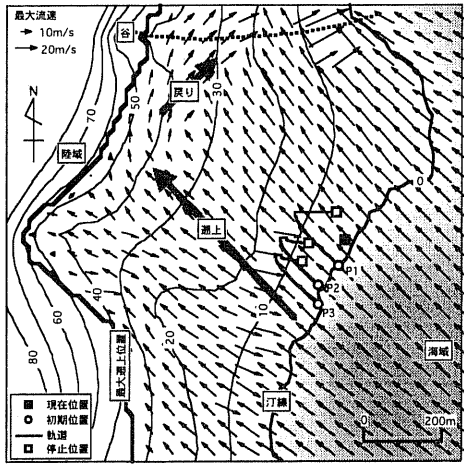
デル(図-5)を用いた。このモデルは、地震による断層モデルに、その他に津波を発生させる要因(地滑りなど)があったとして、これを断層モデルに置き換えて、組み合わせたものになっており、報告されている痕跡高さを良好に再現している。

また、適用する津波石は図-5に示す3箇所に存在するもので、古文書に明和津波で移動したと記述されており、河名⁶⁾の調査により、現在位置が明らかにされ、津波来襲前の位置も推定されている。それぞれの石の条件は表-1のようになっている。また、静止、動摩擦係数(滑動時)は吉田⁵⁾が現地でも実測して得た0.75, 0.71を用いた。

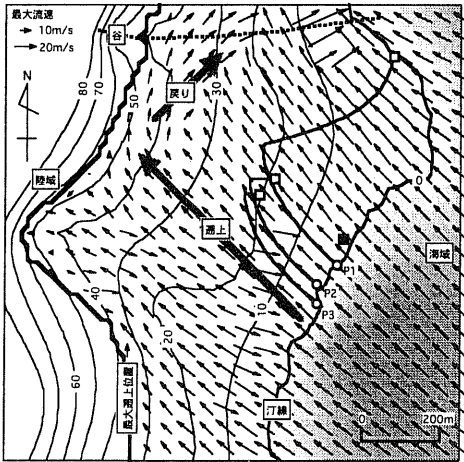
(2) 安良の津波石

安良の津波石は、津波により約30間(54.6m)北方へ移動したと報告されているため⁶⁾、図-6に示す3点(P1, P2, P3)を初期位置として仮定して計算を行った。図中のベクトルは各地点の最大流速の大きさと向きを表しており、主要な流れの方向がわかる。

ベクトル図から、津波石付近に入射した流れは、北西の方向へ遡上した後、若干標高が低くなっている谷地形(図-6)の方に流れ出たことが推測できる。ここでは、遡上・戻り流れの経路が異なっている。また、改良モデルについて、β(式(4))と摩擦係数(式(3))を、図-7に示す。従来モデル(μ一定、図-6(a))では、遡上する流れにより内陸側へ移動した後、引き波により海岸のほうへ引き戻されているが、津波石の現在位置



(a) μ 一定 (従来モデル)



(b) μ 変化 (改良モデル)

図-6 安良で解析結果 (最大流速と石の移動)

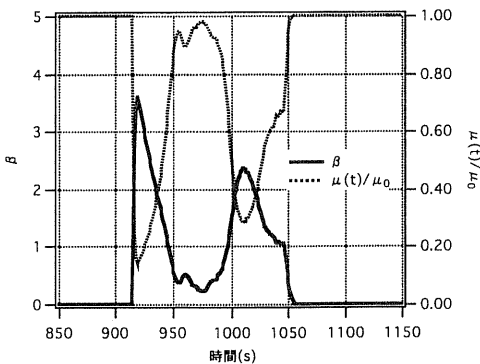


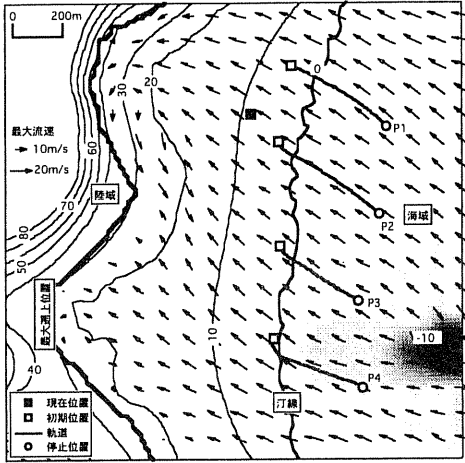
図-7 β と $\mu(t)$ の時間変化 (P1, 安良)

のある海岸付近までは引き戻されず、途中で停止している。改良モデル (μ 変化, 図-6 (b)) では、移動速度の増加に伴って、 β が3を以上になり、摩擦係数が滑動時の摩擦係数の2割以下まで低下している。そのため、従来モデルより移動速度が大きくなり、内陸側への移動距離も大きくなった。初期位置がP1の場合は、谷へ流れる戻り流れにより移動したため、初期位置からの移動距離が極端に大きくなった。初期位置がP2, P3の場合は、P1と比べて若干南側で一旦停止したため谷の方には流されず、東側へわずかに戻された。しかし、その停止位置は現在位置より200m程内陸側になっている。また、遡上する流れによる移動方向は全て内陸方向で、現在津波石がある海岸線の方向と異なっていることから、一度内陸方向へ移動した後で、戻り流れにより戻されて現在位置に到達したと考えられる。

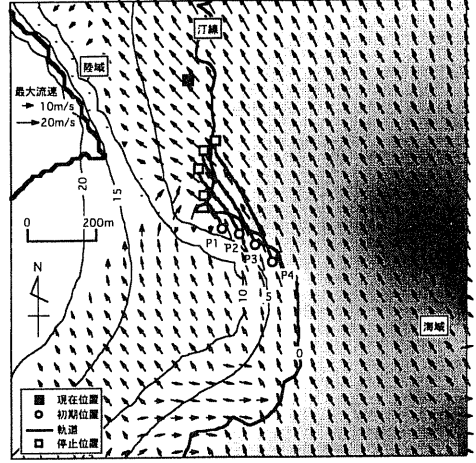
(3) 伊野田の津波石

伊野田の津波石は、津波前は海岸から3町(327m)程沖にあったが、津波により海岸から2町(218m)程内陸に移動したと報告されている⁶⁾。津波前の具体的な位置は不明であるため、図-8に示す4点(P1, P2, P3, P4)を仮定して計算を行った。

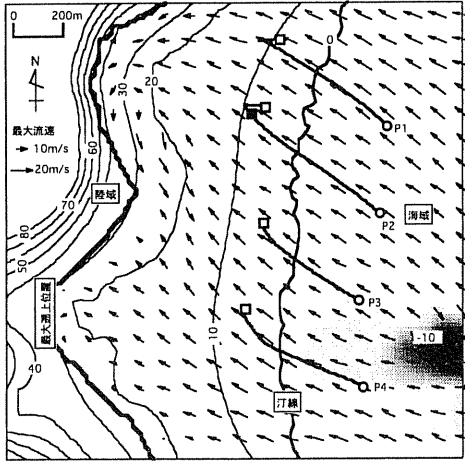
この地域は、南北方向に平坦であるため、津波の入射状況も一様で、初期位置を変化させても内陸方向への移動距離に大きな差はない。従来モデル (μ 一定, 図-8 (a)) では、内陸方向への移動距離が小さく、津波石の現在位置まで到達していない。改良モデル (μ 変化, 図-8 (b)) では、 β (式(4))が最大で3程度になり、摩擦係数 $\mu(t)/\mu_0$ (式(3))は、0.2まで低下した(図-9)。そのため、移動速度、移動距離が大きくなり、現在の津波石の位置付近まで移動した。また、安良と比べて勾配が小さいことから引き波の流速が大きくなり、引き波により大きく引き戻されることはなかった。P2からの結果が、現在位置と良く一致していることから、津波前の位置はP2付近であった可能性が



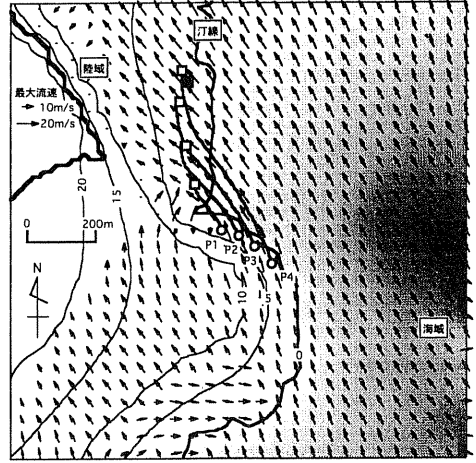
(a) μ 一定 (従来モデル)



(a) μ 一定 (従来モデル)



(b) μ 変化 (改良モデル)



(b) μ 変化 (改良モデル)

図-8 伊野田での解析結果
(最大流速と石の移動)

図-10 大浜での解析結果
(最大流速と石の移動)

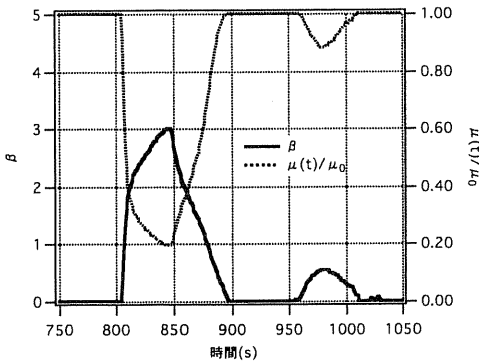


図-9 β と $\mu(t)$ の時間変化 (P2, 伊野田)

高く、津波石は約650m移動したと推定できる。このような平坦な地形条件では、改良モデルにより良好な結果が得られやすいと考えられる。

(4) 大浜の津波石

大浜の津波石は図-10に示す初期位置の付近から、約500m北に移動したと報告されており⁶⁾、ここでは4点 (P1, P2, P3, P4) を仮定して計算を行った。

津波は南方から進入し、東側へ張り出した

陸地の影響を受けながら津波石の初期位置に到達している。初期位置を変化させても移動方向はほぼ同じで、津波石の現在位置の方向に向かっているが、移動距離が大きく異なっている。地形の影響で、初期位置の付近では流れが変化しやすく、それが移動距離の差につながったと考えられる。従来モデル (μ 一定, 図-10 (a)) では移動距離が小さく、実際の津波石の移動を説明できなかったが、改良モデル (μ 変化, 図-10 (b)) で初期位置をP3, P4とした場合は、現在の津波石の位置付近まで移動した。P4の場合、 β (式 (4)) は、2程度になり、 $\mu(t)/\mu_0$ は0.4を下まわった (図-11)。このような地形では、初期位置を変化させると移動距離も大きく変化する可能性がある。

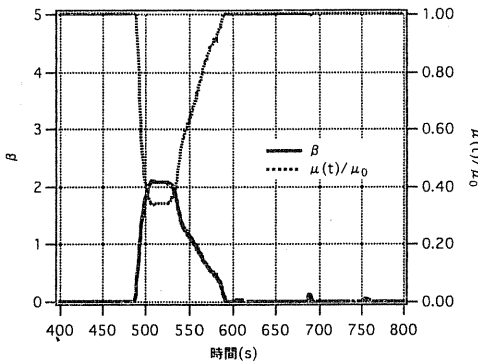


図-11 β と $\mu(t)$ の時間変化 (P4, 大浜)

(5) 結果の整理

以上の結果をまとめたものを表-3に示す。改良モデルでは、従来のモデルより移動距離が大きくなり、伊野田、大浜での津波石の移動を評価することができたが、安良の津波石については移動距離が過大になった。安良では、津波の遡上と引きの経路が異なり、計算での移動方向が現在の津波石の方向ではないなど、解析が難しい条件であると考えられ、さらに検討が必要である。

4. 終わりに

立方体ブロックを移動させる水理実験を実施した結果、ブロックは転動のような移動形態で移動し、従来の摩擦係数を一定とするモデルでは移動距離が過小になることがわかった。そこで、ビデオで撮影した映像からブロックの動きを再現できる摩擦係数を算出し、ブロックの移動速度の関数で表す改良モデルを提案し、実験でのブロックの移動を精度良く再現することができた。また、これらのモデルを石垣島の津波石に適用した結果、平坦な地形条件では改良モデルにより良好な結果が得られたが、複雑な地形条件では、移動方向が一致せず、初期位置によって移動距離が大きく異なる結果となった。

表-3 結果の整理

	地形特徴	津波の来襲状況	数値モデルの再現性	特記すべき事項
安良	起伏、勾配が大	遡上と戻りの経路が別	改良モデルの結果は従来モデルよりさらに移動距離が過大	計算による津波石の移動方向が、現在の津波石がある方向と異なる
伊野田	平坦 直線 海岸勾配が小	入射方向が一様	従来モデルでは移動距離が小さいが、改良モデルでは良好に再現	平坦な地形条件では、改良モデルにより良好な結果が得られやすい
大浜	湾奥部 起伏 が大海岸線が 複雑	陸地を回り込み到達	従来モデルでは移動距離が小さいが、改良モデルでは初期位置によっては良い結果	複雑な地形条件で、初期位置によって結果が大きく異なる

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 牧野清 (1981) : 改訂増補 八重山の明和と津波, 城野印刷, 462p.
- 3) 中川博次・辻本哲郎・細川泰廣 (1979) : 移動床における掃流砂れきの不規則運動性について, 京都大学防災研究所年報, 第22号B-2, pp. 553-573.
- 4) 萩原国宏 (1986) : 流体力, 新体系土木工学, 第25巻, p58.
- 5) 吉田功 (2001) : 石垣島における1771年明和と津波の数値解析, 東北大学修士論文, 84p.
- 6) 河名俊男 (2000) : 琉球列島南部の宮古諸島と八重山諸島における1771年明和と津波の遡上高と岩塊の移動, 及び沖縄県南部における大型台風の高潮と古津波による岩塊の移動, 東海・東南海・南海地震津波研究会津波防災対策現地調査ガイドブック, 25p.