海底地すべりに伴う津波の初期水位推定式の適用条件に関する考察

木場　正信[1]・保坂　幸一[2]・木原　直人[3]・鈴木　和磨[4]

[1]正会員　株式会社エングローブコンサルタント（〒177-0051 東京都練馬区関町北5-16-34-404）
E-mail: koba@egc.co.jp (Corresponding Author)
[2]八千代エンジニヤリング株式会社　事業統括本部国内事業部河川部
（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）
E-mail: kc-hosaka@yachiyo-eng.co.jp
[3]正会員 電力中央研究所　サステナブルシステム研究本部　気象・流体科学研究部門
（〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646）
E-mail: kihara@criepi.denken.or.jp
[4]中部電力株式会社　原子力本部原子力土建部（〒461-8680 名古屋市東区東新町1番地）
E-mail: Katou.Katsuhide@chuden.co.jp

海底地すべりによる津波の解析においては，初期水位の簡易推定式が広く用いられる．しかし，この式は限られた条件下の数値解析に基づいており，条件を外れると非現実的な解を与える場合がある．本研究では，より広い条件下で合理的な解を得る方法を提案した．数値解析との対比等により，地すべりの没水深や移動距離に応じ式に与えるべき制限及び初期加速度に着目した適用式の選択方法を示した．また，適切な係数選択を行えば，二重ガウス分布で水理実験の空間波形を良く再現できることを確認した．さらに，水位に影響を与える地すべり速度について，抗力係数等のパラメータを適切に設定することで水理実験を再現できることを示した．この点は，併せて実施した2018年スラウェシ津波の再現解析でも認められた．

Key Words : *submarine landslide tsunami, initial tsunami amplitude, predictive equations*

1. 序論

海底地すべりにより発生する津波は，地すべり体の移動に伴う地形変化が海水を動かすことにより発生し，周囲に伝播する．津波の数値解析には大別して，海水が静止した状態から解析を始める方法(cold start)と，地すべり諸元から推定した波形を初期条件として解析する方法(hot start)の2種類がある．後者の方法として代表的なものにGrilli et al.[1]及びWatts et al.[2]による初期水位推定式（以下，「Watts式」と呼ぶ）があり多くの適用例がある．Watts式は，津波発生効率の高い固定形状の地すべり2タイプを対象としている．ひとつは，摩擦の小さい斜面において斜面と並行に滑落し，速度と移動量が大きいスライド型である．もうひとつは，底面摩擦が有意で速度と移動量が小さく，地すべり体が回転成分をもつスランプ型である．

図-1のように変数を定義する．Watts式の主たる目的は，現象が断面内で生じるとき，地すべり諸元から地すべり初期中心直上位置 $x = x_g$ に生じる最大水位下降量$\eta_{0,2D}$を推定することである．Watts et al.[2]は理論及び鉛直2次元境界要素モデルを用いた数値実験に基づき，以下の関係を提示した．

スライドは，静止した地すべり体が加速し，抗力と釣り合う一定速度に漸近することを前提としており，位置Sの時間発展は，

$$S(t) = S_0 \ln\{\cosh(t/t_0)\} \tag{1}$$

で表現され，理論及び数値実験に基づき$\eta_{0,2D}$は，

$$\eta_{0,2D} = S_0(0.0574 - 0.0431\sin\theta)(T/b)(b\sin\theta/d)^{1.25} \times \left\{1 - e^{-2.2(\gamma-1)}\right\} \tag{2}$$

で求められる．ここで，S_0は特性距離$(= {u_t}^2/a_0)$，γは地すべりの比重である．特性時間t_0は最終速度u_t及び初期加速度a_0との間に$t_0 = u_t/a_0$の関係をもち，a_0及び

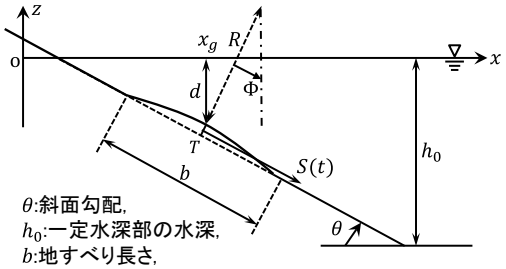

図-1　海底地すべりによる造波に係る変数[1]

u_tはそれぞれ以下の式で与えられる．

$$a_0 = g\sin\theta\cdot(\gamma-1)/(\gamma+C_m)\cdot(1-C_n/\tan\theta) \quad (3)$$

$$u_t = (gd)^{0.5}[(b\sin\theta/d)\{0.5\pi(\gamma-1)/C_d\} \times(1-C_n/\tan\theta)]^{0.5} \quad (4)$$

ここで，C_nは底面摩擦係数，C_mは付加質量係数，C_dは抗力係数であり，数値実験では$(C_n, C_m, C_d) = (0,1,1)$を仮定している．なお，主な造波は時間$t_0$までに生じるとしている．

スランプは，静止した地すべり体が加速し，最大速度に達した後に減速し停止する運動を前提としており，地すべり位置の時間発展と$\eta_{0,2D}$は以下で与えられる．

$$S(t) = S_0\{1-\cos(t/t_0)\} \quad (5)$$

$$\eta_{0,2D} = S_0(0.131/\sin\theta)(T/b)(b\sin\theta/d)^{1.25}(b/R)^{0.63} \times(\Delta\Phi)^{0.39}\{1.47-0.35(\gamma-1)\}(\gamma-1) \quad (6)$$

ここで，特性距離S_0は最大速度に達する距離であり，移動距離の半分である．また，初期加速度a_0及び最大速度u_{max}は，それぞれ以下の式で与えられる．

$$a_0 = S_0/{t_0}^2 \quad (7)$$

$$u_{max} = S_0/t_0 \quad (8)$$

ここで，特性時間t_0は，

$$t_0 = (R/g)^{0.5}\{(\gamma+C_m)/(\gamma-1)\}^{0.5} \quad (9)$$

であり，曲率半径Rは，$\Delta\Phi = 2S_0/R$により回転角と関係づけられる．また，放物線の頂点における曲率半径に基づき$R = b^2/(8T)$と近似できるとしている．運動に関するパラメータは，$(C_n, C_m, C_d) = (S_0/(R\cos\theta),1,0)$を仮定している．スランプ式ではスライド式と異なり，移動距離$2S_0$を既知の条件として与える必要がある．

式(2)または式(6)で与えられる水位$\eta_{0,2D}$は，地すべり初期位置直上における最大水位下降量である．2次元断面内における$\eta_{0,2D}$から波形$\eta(x)$への拡張は，地すべり初期位置x_0に片方のピークをもつ2つのガウス分布の重畳を仮定し，以下の式により行われる．

$$\eta(x) = -\left(\eta_{0,2D}/\eta_{max}\right)[\exp\{-(x-x_0)^2/{\lambda_0}^2\} -\kappa'\exp\{-(x-\Delta x-x_0)^2/{\lambda_0}^2\}] \quad (10)$$

ここで，η_{max}は[ ]内の最大値，λ_0は特性津波波長で$\lambda_0 = t_0\sqrt{gd}$（gは重力加速度）である．Δxはガウス分布の中心間の距離である．Δxとκ'の形状パラメータを調整することにより波形を変化させることができる．

Watts et al.[2]は式が適用できるパラメータ範囲を示しているが，限られた数値実験の実施範囲に他ならない．現実には，提示された範囲外の地すべりが存在することも多くあり，外挿可能な範囲の不明確さは現実的でない津波想定の可能性を生む．

本研究の目的は，より広範な条件下で合理的な解を得るために，考慮すべき適用範囲及び式の修正方法を提案することである．

2. 初期水位推定式に関する問題と検討方針

(1)～(5)に示す検討を，4.～8.でそれぞれ実施する．

(1) 初期没水深の範囲

式(2)及び式(6)は，初期没水深dの増大に対し津波水位が減少する形式である．そのため，dがかなり小さくなった場合，巨大な水位を与えることがある．Watts et al.[2]の数値実験における初期没水深dと地すべり厚さTの比d/Tの範囲は，2.5～15（スライド），3.3～3.4（スランプ）であるが，津波想定等の実務においてはdがより小さい範囲まで評価する必要性があると考え，適用可能範囲の下限を確認する．

(2) スライドの移動距離に限界がある場合の措置

スライド式は，地すべり初期位置上の水位が成長するために十分な長さの一様勾配斜面が連続することを前提としている．しかし，現実の海底では地形の起伏により地すべりが停止する場合もある．停止する場合に津波水位を制限する考え方の採用事例はある[3]が，方法は明確でない．ここでは，地すべりが初期段階で停止する場合の初期水位に与える影響と式の修正方法を検討する．

(3) スライド式とスランプ式の使い分け

Watts et al.[2]の数値実験では，スランプの回転運動は反映せず，加減速パターンとそれに伴う移動距離の違いによりスライドと区別している．両式の水位に著しい乖離がある場合，式の選択により津波の想定規模が左右されることとなるが，選択基準は曖昧である．また，現実には両タイプの中間的な地すべりも多く存在するため，両式の適切な使い分けの目安を検討する．

(4) 最大振幅から波形への展開

式(10)に関する課題のひとつは，単純な二重ガウス分布で実際の初期波形を再現できるかという点の確認である．また，Δxとκ'が不明であるとき，ピーク間の距離であるΔxを$0.5\lambda_0$とし[4]，上昇側ピーク≃下降側ピークを仮定してκ'=1とすることが概略的な推定として考えられる．もう一点は，この推定の妥当性の確認である．

(5) 地すべり運動に係るパラメータ

Watts et al.[2]は，付加質量係数，抗力係数及び底面摩擦係数について，前述の設定で地すべり移動の時間発展を与えた津波解析を実施している．Watts式はこの前提に基づく回帰式となっているため，地すべり速度がこの前提と乖離する場合，津波水位の予測誤差が大きくなる可能性がある．そこで，地すべり運動に関するこれらパラメータが，津波水位に与える影響を評価する．

表-1　断面2次元津波解析の設定

項　目	設　定	備　考
水路長	15～20 m	反射波の影響を排除
水平格子間隔	地すべり長さの1/80	Grilli et al.[1]による1/76（境界要素法）を参考
鉛直層数	20	等間隔
地すべり比重	1.25	水の密度は1000 kg/m^3
底面摩擦	なし	
水の粘性及び圧縮性	なし	理想流体を仮定
陸側境界条件	移動境界	遡上，海底露出を考慮

3.　検討に用いたデータ及び手法

検討にあたっては，課題に応じ，以下に示す数値解析モデル及び水理実験結果を用いた．なお，実地形を対象とした津波シミュレーションの設定は結果と共に示す．

(1)　数値解析モデル

断面2次元津波解析のため，非静水圧モデルNHWAVE[5]を用いた．これは，鉛直方向にシグマ座標系を用いたGodunov型有限体積法モデルである．理想流体を仮定し，解析の設定は**表-1**のとおりとした．なお，解析に先立ち，Grilli et al.[1]に示された境界要素法モデルによる数値計算及び水理実験結果の再現性を確認している．Grilli et al.[1]及びWatts et al.[2]と同様に地すべりの変形は考慮せず，地すべり厚さζは以下のガウス分布とした．

$$\zeta = T/(1-\varepsilon)\cdot\{\mathrm{sech}^2(\kappa\xi)-\varepsilon\} \qquad (11)$$

ここで，ξは長さ方向の座標（中心をゼロ）であり，$\kappa = 2C/b$，$C = \cosh^{-1}\left(1/\sqrt{\varepsilon}\right)$である．係数$\varepsilon$は，地すべり体が概ね半楕円となる0.75とした．

(2)　水理実験データ

表-2に示す既往水理実験結果を用いた．いずれも地すべり模型の移動に伴う断面内の初期水位を計測している．

表-2　既往水理模型実験の諸元

項　目	藤井ら[6]	Watts[7]	Sabeti et al.[8]
地すべり模型構造（　）内は材質	固体（鋼板），粒状体（ガラス）	固体（ポリ塩化ビニル）	固体（コンクリート）
斜面勾配θ（°）	45	45	45
初期没水深 d (m)	0.15～0.40	0.059～0.075	0.08
地すべり長さ b (m)	0.566	0.121	0.20～0.106
地すべり厚さ T (m)	0.166～0.283	0.061	0.10～0.53
地すべり比重γ	1.9～2.5	1.225～2.745	2.6

4.　没水深の下限に関する数値解析

3.(1) に述べた数値解析モデルを用い，初期没水深dを変化させた数値解析を実施した．斜面勾配15°のときの例を**図-2**に示す．図中，灰色で示すのは，Watts式の根拠となった数値解析の横軸方向範囲であり，本検討ではdの小さい側に範囲を拡大している．dの大きい領域では，数値解析結果とWatts式の変化は調和的である．dが小さくなると数値解析による初期水位は頭打ちとなるのに対し，Watts式では単調に増大し，地すべり厚さTの数倍に及ぶ過大な水位を与える．次に，斜面勾配を7.5°から30°まで変化させたときの数値解析に対するWatts式の水位の比率を**図-3**に示す．dの減少に対し水位の比率が急増する区間をWatt式の信頼度が低い区間と考えると，スライド式，スランプ式ともにd/T= 0.2～0.4程度以下がこれにあたる．d/Tが 0.2以下の場合，Watts式は明確に過大となっている．この領域では数値解析の水位が頭打ちとなることから，$d/T \leq$0.2の場合，d/T= 0.2に固定して式を適用すれば異常な解を回避できると考えられる．

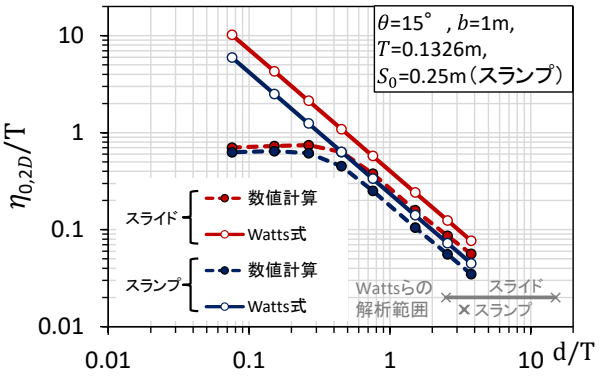

図-2　数値解析とWatts式による地すべり没水深に対する初期水位の感度の比較例（斜面勾配15°）

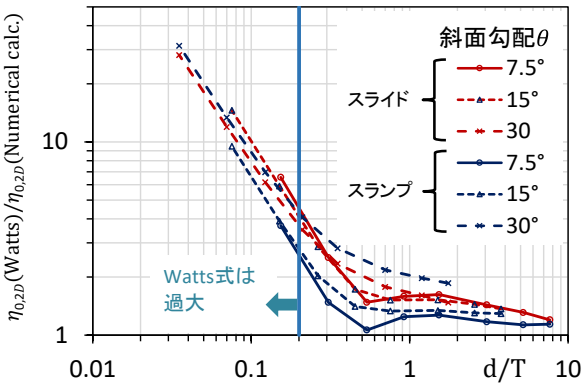

図-3　数値解析とWatts式による初期水位の比率（初期没水深の影響）

5. 移動距離が制限される場合の水位に関する数値解析

斜面長に制限がある場合を想定し，スライドの移動距離を変化させた際の初期水位の変化を3.(1) に述べた数値解析モデルにより求めた．図-4(a)に示すように，Watts式に従い移動するスライドが，図中のマーカー位置に到達した時点で急停止する場合を想定する．停止位置は，特性時間t_0までの移動距離を基準に0.05倍～1.0倍の範囲とした．このとき，$x = x_g$に生じる時刻歴波形は図-4(b)のようであり，下降水位の発達中に地すべりが停止した場合，$\eta_{0,2D}$は十分な移動距離をもつ場合より小さくなる．その後にスライドが停止した場合，$\eta_{0,2D}$は不変となった．

図-1から，$x = x_g$位置への造波は，地すべり体が概ね直下にある時間帯すなわち$t \le t(S = 0.5b)$の範囲で生じると考えられる．そこで，この範囲内のとき造波時間の割合に応じた以下の修正を行う．

$$\eta_{0,2D}{}_{modified} = \eta_{0,2D}{}_{original} \cdot \min\{t_{stop}/t(x = b/2), 1\} \quad (12)$$

なお，添え字$stop$は停止時間を表す．斜面勾配や初期水深を変化させた解析を追加し，上式による修正Watts式と初期水位を比較した．図-5のように数値解析と同程度の変動パターンが得られ，オリジナルWatts式にみられる短移動距離における著しい過大評価が修正された．

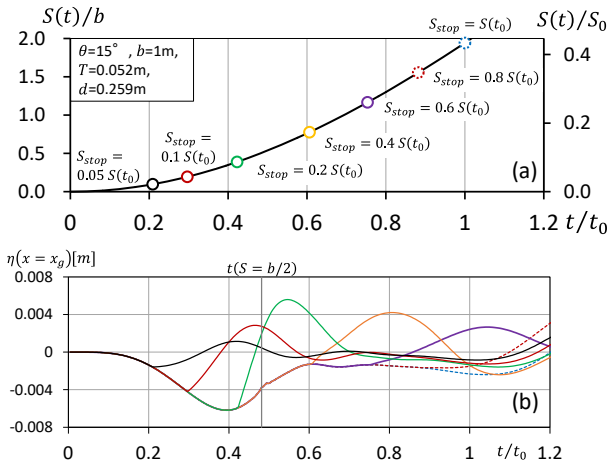

図-4 (a)スライドの移動過程と停止位置及び(b)停止位置と地すべり初期位置直上の時刻歴波形との関係

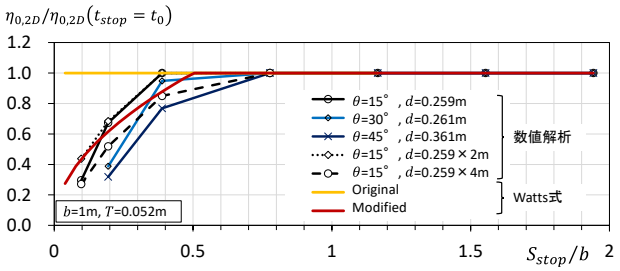

図-5 移動距離に応じた修正を与えたWatts式と数値解析による初期水位の比較

6. スライド式とスランプ式の使い分け

スライド式とスランプ式で初期加速度a_0が等価となる条件は，

$$\Delta\Phi = 2\sin\theta \quad (13)$$

である．また，$\Delta\Phi = 2S_0/R$であるので，

$$S_0 = R\sin\theta \quad (14)$$

とも書ける．スランプでは摩擦を考慮していることから，初期加速度がスライドを上回るのは不合理と考えると，スランプ式の適用限界の目安として，a_0がスライド以下になる範囲が考えられる．

両式のa_0が等しくなるS_0をプロットすると，図-6のようになる．なお，スランプの曲率半径Rは$b^2/(8T)$により与えた．図-6の各線より下側，つまりスランプの移動距離が小さい側でスランプのa_0がスライドを下回るが，緩勾配であるほど，また地すべりが厚い（長さに対し曲率半径が小さい）ほど，その範囲は限定的となる．

斜面勾配5°のときの両式による水位は，S_0に対し図-7のようになる．スライド式は，5.で述べた移動距離による制限を反映している．スランプについて破線で示した範囲ではa_0がスライドを上回るため，スライド式を用いた方が合理的である．これにより，図の右側で生じる長距離移動する高速のスランプを，非現実的なものとして除外することができる．これは，Watts et al.[2]が「典型的なスランプの移動距離は長さの半分程度」としていることと整合する．なお，図に示した式の使い分けの結果，水位の急変が生じるが，境界は厳密なものではない．境界付近では，回転角ΔΦの合理性や地盤物性に応じた加減速パターンを勘案し，適切な式を選択することが望ましい．

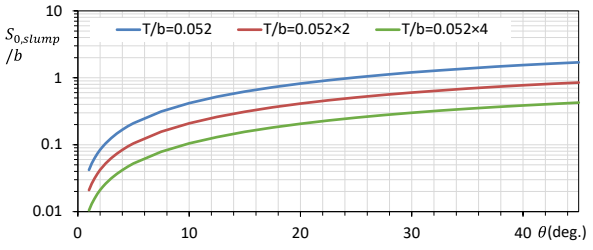

図-6 初期加速度がスライドと等しくなるスランプのS_0

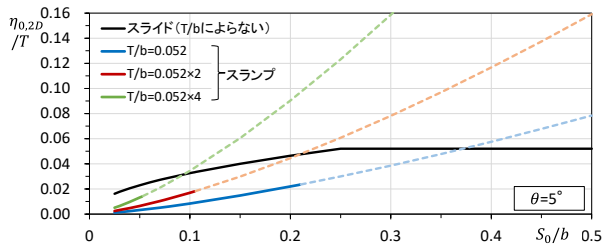

図-7 初期加速度に基づくスランプ式の適用範囲

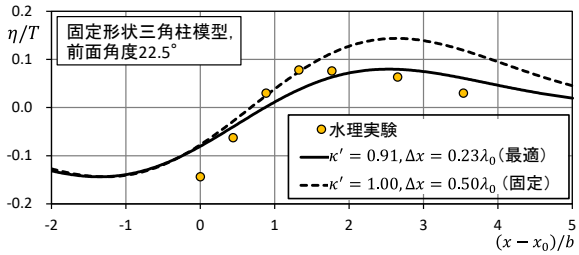

図-8　水理実験とWatts式による初期波形の比較

7.　初期波形の再現性の検証

波形の空間形状を決定する二重ガウス分布のパラメータκ'及びΔxの傾向をみるため，これらパラメータの最適化を行った．再現対象データは藤井ら[6]の水理実験とし，地すべり初期位置直上の波高計位置で水位最低となる時間の計測水位分布に適合するκ'及びΔxを最適化した．最適化はRMSE（自乗平均誤差平方根）最小化を基準にグリッドサーチで実施した．なお，$\eta_{0,2D}$は既知とした．最適化した初期波形の例を**図-8**に示す．最適化結果は**図-8**実線のようであり，波形全体は概ね再現できている．これを含め，模型材料や形状の異なる35ケースの実験[6]について同様の最適化を行ったところ，$\Delta x/\lambda_0$の（最小値, 中央値, 最大値）は(0.13, 0.28, 0.49)，κ'は(0.85, 0.90, 0.95)であった．全体としてκ'は1に近く，Δxはλ_0の半分以下となった．また，2.(4)で述べたように概略的な推定としてΔx=0.5λ_0，κ'=1に固定した場合の波形は，**図-8**破線のようになる．いずれのパラメータも最適値より大きいが，波形の再現性の低下は限定的である．

8.　付加質量係数及び抗力係数による水位への影響評価

(1)　水理実験による初期水位の再現性への影響

スライド式についてWatts et al.[2]による運動パラメータ$(C_n, C_m, C_d) = (0,1,1)$を仮定した場合と，水理実験で観察された地すべり運動を再現した場合で，水位の再現性にどのような影響が現れるかを確認する．そのために，初期加速度と最大速度がまとめられている2文献[7,8]による実験結果を用いた．C_nは文献値のままとし，a_0とu_tが再現されるようC_m, C_dを調整した．なお，文献[7,8,9]には調整後の値が記載されているが，準拠する式がWatts et al.[2]と異なるため，再調整を実施した．

地すべり運動の再現性を向上させた結果，津波初期水位の再現性は**図-9**のように変化した．水位が低下する方向に修正され，過大な予測が解消されている．これは，Watts et al.[2]の係数を用いた場合の地すべり速度が，これらの実験に対して過大であるためとみられる．

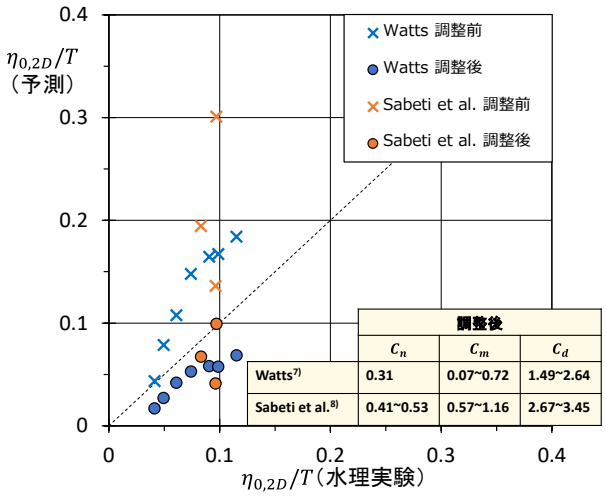

図-9　地すべり運動の再現性を向上させたときの初期水位の再現性の変化

(2)　2018年スラウェシ津波の再現性 への影響

海底地すべりを要因として発生したとされている2018年インドネシア・スラウェシ津波を対象に，抗力係数等の津波痕跡高の再現性に与える影響を検討した．

地震断層モデルは，既往研究[10]を参考にUSGSモデル[注1)]を用いた．海底地すべりモデルは地震前後の地形変化の調査結果[11]をもとに設定されたSchambach et al.[12]による7つ(LS-B～LS-M)と，湾南部の津波再現性のためにCecioni et al.[13]が想定した1つ(LS-N)を設定した．

解析領域及び解析条件を**図-10**に示す．海底地すべりによる初期津波水位はスライド式により**表-3**に示すパラメータで計算した．崩壊方向α，崩壊部没水深d，斜面勾配θは作成した地形データ[注2)]と地すべり地形の位置から設定した．波形作成時の形状パラメータはκ'=1，Δx=0.5λ_0とした．運動パラメータは$(C_n, C_m, C_d) = (0,1,1)$を基本ケースとして，**表-4**のとおり3パターンずつ与えた．

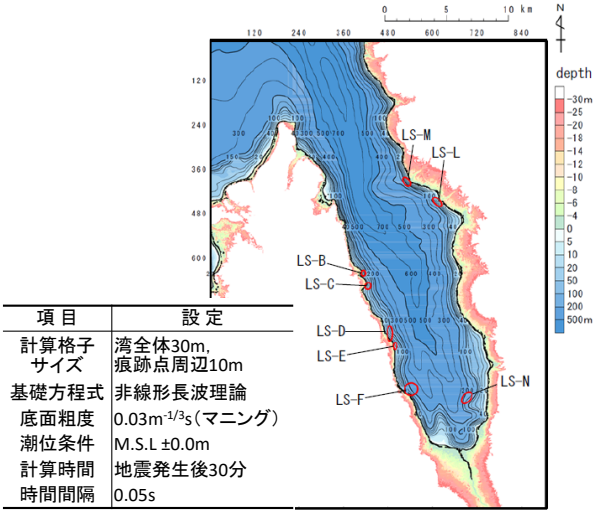

図-10　スラウェシ津波の解析領域及び解析条件

表-3　スラウェシの海底地すべりに適用したパラメータ

地すべり地形	b (m)	w (m)	T (m)	d (m)	θ (°)	α (°)
LS-B	340	380	32	51.1	9.7	90
LS-C	405	440	36	48.9	10.5	105
LS-D	410	1220	18	68.9	8.2	90
LS-E	175	335	18	44.0	8.0	90
LS-F	1000	1000	40	160.2	18.1	50
LS-L	515	830	44	50.0	11.7	225
LS-M	350	800	35	60.8	15.1	250
LS-N	500	1000	150	166.9	8.7	320

b:崩壊部長さ，w:崩壊部幅，T:崩壊部厚さ，α:崩壊方向の北から時計回りの角度，d:崩壊部没水深，θ:斜面勾配

表-4　運動パラメータの設定

項目	設定値	備考
C_n	0.00，0.05，0.10	既往研究[20]の海底地すべり挙動解析で用いられた底面摩擦角0～6°を参考に設定
C_d	1.0，1.4，1.8	既往研究[7),8)]で水理模型実験結果を再現する際に用いられた値を参考に設定
C_m	0.6，1.0，1.2	

海底地すべりによる初期水位分布及び痕跡高[14),15),16),17),18)]と計算津波高の比較結果を図-11に示す．図-11には基本ケース及び比較的良好な津波の再現性を示した$(C_n, C_m, C_d) = (0,1,1.4)$のケースを例示した．基本ケースは相田[19)]の再現性評価指標である幾何平均$K = 0.78$，幾何標準偏差$\kappa = 1.71$，C_dを大きくしたケースでは$K = 1.02$，$\kappa = 1.75$であった．C_dを大きくしたことにより0.75° S以北の湾北西側において水位の過大評価傾向が改善し，Kが1に近づいている．各ケースのKとC_n, C_m, C_dとの関係は図-12のとおりである．パラメータの増加に対しC_dは水位低下，C_mは水位増大する傾向となる．C_nはこの範囲では相対的に感度が低い．

9.　結論

海底地すべりによる津波の初期水位を求めるための簡易推定式の挙動を分析し，以下の結論を得た．

(1) 地すべり初期没水深が厚さの0.2倍以下の場合，明らかにWatts式は水位を過大評価する．0.2倍に固定することにより数値解析との乖離を抑制できる．

(2) 長さの半分以下の移動で停止するスライドでは初期位置直上の造波が制限される．移動時間に比例した倍率を掛ければ数値解析と調和的な水位が得られる．

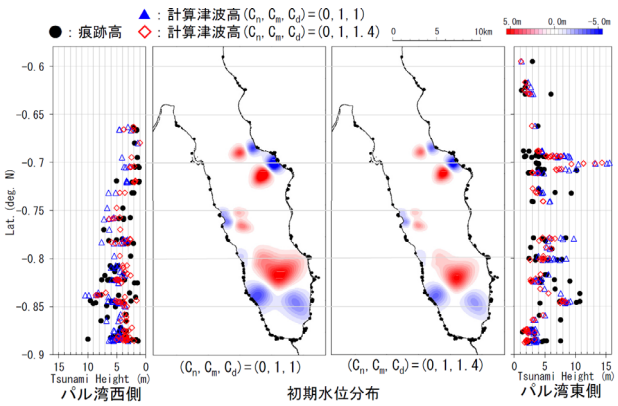

図-11　初期水位分布及び痕跡高と計算津波高の比較

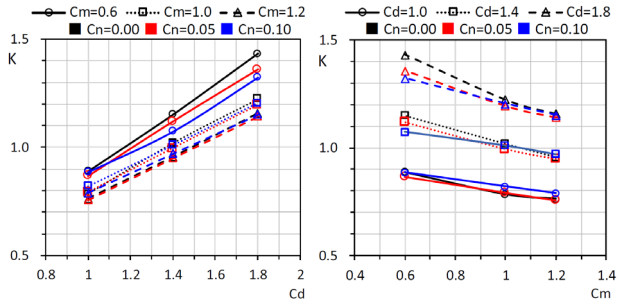

図-12　運動パラメータと津波痕跡高の再現性指標Kの関係

(3) 長距離を移動する地すべりでは，スランプ式を適用すると不合理な高速移動を仮定することがあり，その場合，スライド式を適用する方が適切である．

(4) 最大水位下降量から波形を作成する場合，適切な係数選択を行えば，Watts et al.[2)]による二重ガウス分布を用いた方法により水理実験による波形を再現できる．

(5) 付加質量係数，抗力係数，摩擦係数は地すべりの運動を変化させ，予測水位に強い影響を与える．地すべりシミュレーション等により地すべり運動の情報が得られる場合には，Watts et al.[2)]によるデフォルト値から係数を調整することが望ましい．

これらを考慮することにより，Watts et al.[2)]が示した範囲外にも式を適用することができるとともに，津波想定等において簡易推定式が不合理な解を生じる可能性を低減できる．なお，本稿では抗力係数等が水位に与える影響を示したが，適切な設定方法については今後の課題である．また，本稿で固定形状とした地すべり体の変形による影響を評価する場合には，粒状体モデル等，地すべり体内部の物理を記述した解析を要する．

謝辞：本研究は電力10社による原子力リスク研究センター共研として実施した成果であることを付記するとともに，土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会（委員長高橋智幸関西大学教授）の委員各位に研究成果をご議論頂き，有益なご助言を賜りました．関係各位に謝意を表します．

NOTES

注1) USGS, M7.5–72km N of Palu, Indonesia, https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000h3p4/executive.

注2) インドネシア地理情報局が公開している BATNAS（6秒海底・陸上地形データ）と DEMNAS（0.27 秒陸上地形データ）を使用，https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web.

REFERENCES

1) Grilli, S.T. and Watts, P. : Tsunami generation by submarine mass failure I : Modeling, experimental validation, and sensitivity analysis, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.131, Issue 6, pp.283-297, 2005.
2) Watts, P., Grilli, S.T., Tappin, D.R. and Fryer, G.J.: Tsunami generation by submarine mass failure II : Predictive equations and case studies, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.131, Issue 6, pp.298-310, 2005.
3) 杉野英治, 道口陽子, 佐藤太一:津波ハザード評価の信頼性向上に関する研究, 原子力規制庁 安全研究成果報告, RREP-2021-4002, 86p, 2021. [Sugino, H., Michiguchi, Y. and Sato, T. : Research on reliability improvement of tsunami hazard assessment, S/NRA/R Research Report, Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority , RREP-2021-4002, 86p, 2021.]
4) Heidarzadeh, M., Krastel, S. and Yalciner, A.C.: The state-of-the-art numerical tools for modeling landslide tsunamis: A short review, in Submarine mass movements and their consequences, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Vol.37, pp.483-495, 2014.
5) Ma, G., Shi, F. and Kirby, J.T.: Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes, *Ocean Modelling*, Vol. 43-44, pp.22-35, 2012.
6) 藤井直樹, 松山昌史, 加藤勝秀: 海底地すべりによる津波の生成に関する実験的研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), 77巻, 2 号, pp. I_235-I_240, 2021. [Fujii, N., Matsuyama, M. and Kato, K.: Hydraulic experimental study of tsunami generation by submarine landslide, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering),* Vol.77, Issue 2, pp. I_235-I_240, 2021.]
7) Watts, P.: Wavemaker curves for tsunamis generated by underwater landslides, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.124, Issue 3, pp.127-137, 1998.
8) Sabeti, R. and Heidarzadeh, M.: A new empirical equation for predicting the maximum initial amplitude of submarine landslide-generated waves, *Landslides*, Vol.19, Issue 2, pp. 491-503, 2022.
9) Najafi-Jilani, A. and Ataie-Ashtiani, B.: Estimation of near-field characteristics of tsunami generation by submarine landslide, *Ocean Engineering*, Vol.35, Issues 5-6, pp. 545-557, 2008.
10) Heidarzadeh, M. and Mulia, I.E.: A new dual earthquake and submarine landslide source model for the 28 September 2018 Palu (Sulawesi), Indonesia tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.65, Issue 1, pp.97-109, 2022.
11) Liu, P.L., Higuera, P., Husrin, S., Prasetya, G.S., Prihantono, J., Diastomo, H., Pryambodo, D.G. and Susmoro, H.: Coastal landslides in Palu Bay during 2018 Sulawesi earthquake and tsunami, *Landslides*, Vol.17, pp.2085-2098, 2020.
12) Schambach, L., Grilli, S.T. and Tappin, D.R.: New high-resolution modeling of the 2018 Palu tsunami, based on supershear earthquake mechanisms and mapped coastal landslides, supports a dual source, *Frontiers in Earth Science*, Vol.11, pp.1-22, 2021.
13) Cecioni, C., Iorio, V., Bellotti, G. and Grilli, S.T.: Probabilistic landslide tsunami modeling of the 2018 Palu Bay event. *Coastal Engineering*, Vol.183, Article 104332, 2023.
14) Cipta, A, Omang, A., Supartoyo, Minarno, P.A. Solikhin, A., Falah, F.N. and Efendi, R.: Anomali perilaku gelombang tsunami, *Di balik pesona Palu : Bencana melanda geologi menata*, Badan Geologi, pp.133-141, 2018. [Cipta, A, Omang, A., Supartoyo, Minarno, P.A. Solikhin, A., Falah, F. N. and Efendi, R.: Tsunami wave behavior anomalies, *Behind the Charm of Palu : Disaster struck geological order*, Bandung Geological Agency, pp.133-141, 2018.]
15) Pribadi, S., Gunawan, I., Nugraha, J., Haryono, T. and Ermawan, C.: Merekam jejak tsunami teluk Palu 2018, *Laporan Survey Tsunami BMKG*, pp.1-7, 2018. [Pribadi, S., Gunawan, I., Nugraha, J., Haryono, T. and Ermawan, C.: Survey tsunami teluk Palu 2018, *BMKG Tsunami Survey Report*, pp.1-7, 2018.]
16) Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M., Takabatake, T., Nakamura, R., Nishida, Y., Achiari, H., Rusli, Marzuki, A. G., Marzuki, M.F.H., Stolle, J., Krautwald, C., Robertson, I., Aránguiz, R. and Ohira, K.: Field survey of the 2018 Sulawesi tsunami: inundation and run-up heights and damage to coastal communities, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.176, pp.3291-3304, 2019.
17) Omira, R., Dogan, G.G., Hidayat, R., Husrin, S., Prasetya, G., Annunziato, A., Proietti, C., Probst, P., Paparo, M.A., Wronna, M., Zaytsev, A., Pronin, P., Giniyatullin, A., Putra, P.S., Hartanto, D., Ginanjar, G., Kongko, W., Pelinovsky, E. and Yalciner, A.C.: The September 28th, 2018, tsunami in Palu-Sulawesi, Indonesia: A post-event field survey, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.176, Issue 4, pp.1379-1395, 2019.
18) Widiyanto, W., Santoso, P.B., Hsiao, S-C. and Imananta, R.T.: Post-event field survey of 28 September 2018 Sulawesi earthquake and tsunami, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.19, Issue 12, pp.2781-2794, 2019.
19) 相田勇: 三陸沖の古い津波のシミュレーション. 地震研究所彙報, 東京大学, Vol.52, pp.71-101, 1977. [Aida I.: Simulations of large tsunamis occurring in the past off the coast of the Sanriku District, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 52, pp.71-101, 1977.]

20) Nakata, K., Katsumata, A and Muhari, A.: Submarine landslide source models consistent with multiple tsunami records of the 2018 Palu tsunami, Sulawesi, Indonesia, *Earth, Planets and Space*, Vol.72, Article 44, 2020.

(Received March 14, 2024)
(Accepted July 18, 2024)

A STUDY ON THE APPLICATION CONDITIONS OF THE INITIAL WATER LEVEL PREDICTION EQUATIONS FOR TSUNAMI ASSOCIATED WITH SUBMARINE LANDSLIDE

Masanobu KOBA, Koichi HOSAKA, Naoto KIHARA and Kazuma SUZUKI

The predictive equations are widely used to estimate the initial water level of tsunamis caused by submarine landslides. However, the equations are based on numerical analyses under limited conditions and may give unrealistic solutions when the conditions are unmet. In this study, we propose a method to obtain a reasonable solution under a broader range of conditions. Through comparison with numerical and other analyses, we show the restrictions that should be added to the equation depending on the landslide submergence depth and travel distance and how to select the applicable equation of landslide type focusing on the initial acceleration. It was also confirmed that the double Gaussian distribution can reproduce the spatial waveforms obtained by hydraulic experiments with an appropriate selection of coefficients. Furthermore, we showed that the landslide velocity, which affects the water level, can be reproduced by adjusting parameters such as the drag coefficient in the equations. The impact of the parameters on the tsunami water level was also confirmed by the analysis of the 2018 Sulawesi tsunami.