

質点系の支配方程式に基づく土砂災害危険領域設定手法の現地への適用と評価

本田尚正・春日菜季（茨城大理）

Abstract: This paper estimates the sediment hazards zone prediction method based on governing equations of a mass point system for soil block dynamics in mountainous area. Part of Tokamachi City, where numerous surface failures and landslides took place due to the Mid Niigata Prefecture Earthquake on October 2004, was chosen for investigation. The validities of numerical predictions are confirmed in terms of the data of sediment hazards zones legally established by Niigata prefecture, i.e., yellow and red zones. According to the analysis, most of the sediment hazards zones predicted by the present method are in good agreement with the yellow zone data. In the remaining zone, calculated by the present method, but not legally established as a yellow zone, erosion control facilities such as retaining wall works and crib works have been constructed against sediment hazards. These results emphasize that the present method is very useful for widely and simply predicting sediment hazards zone.

Key words: surface failure, governing equations of mass point system, sediment hazards zone

要旨：本研究では、山地域での土塊の運動に関する質点系の支配方程式に基づく土砂災害危険領域の設定手法について評価を行った。検討対象地域は、2004年10月の新潟県中越地震で数多くの表層崩壊や地すべりが発生した十日町市域である。同地域内で当手法によって土砂災害危険領域を設定し、それと新潟県により公表されている土砂災害警戒区域等（イエローゾーンおよびレッドゾーン）とを比較した。その結果、計算結果とイエローゾーンはよく一致した。一方、計算では危険領域とされるがイエローゾーンに指定されていない箇所では、擁壁工や法枠工といった防護施設によって、一定の防災対策が施されていた。以上の結果から、当手法によって土砂災害危険領域を広域的かつ簡便に設定でき、その有用性はきわめて高いことが示された。

キーワード：表層崩壊、質点系の支配方程式、土砂災害危険領域

I はじめに

日本における最近の水・土砂災害の特徴は、台風や集中豪雨による中小河川の氾濫や土砂災害といった局地的、地域性の強い災害が顕在化している点であり、それらへの適切な対応は国土防災上の緊急課題となっている。とくに土砂災害に関しては、平成11年6月豪雨による広島災害（土砂災害発生件数325件、死者24名）を教訓として平成12年5月にいわゆる「土砂災害防止法」が公布され、翌13年4月に施行された。そして、平成15年に広島県で始まった土砂災害警戒区域等の指定（当初13箇所）は順次全国に拡がり、平成20年5月現在、47すべての都道府県で全645市町村、90,462箇所（うち土砂災害特別警戒区域37,169箇所）にまで拡大している。

それらは、まず土砂災害警戒区域（イエローゾーン）では、急傾斜地崩壊・土石流・地すべりといった土砂災害の形態ごとに、斜面勾配、急傾斜地の高さ、土石流溪流の扇状地勾配、地すべり土塊の想定長さ等を勘案して区域設定がなされる。たとえば、急傾斜地崩壊の場合、「傾斜度が30度以上で高さが5.0m以上の区域、急傾斜

地の先端から水平距離が10m以内の区域、急傾斜地の下端から急傾斜地高さの2倍（50mを超える場合は50m）以内の区域」とされている。上記に加えて土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）では、人家等の保全対象の存在を念頭に置き、土石等の移動等によって建築物に作用する力が住民の生命や身体に著しい危害を生ずる恐れが生じる場合を想定して区域設定がなされる。

一方、地域全体の防災計画を策定する上では、土砂災害の危険性をまず広域的に把握することが重要である。伊藤らは、急斜面で崩壊が発生した場合に土砂が到達する最長距離を質点系の支配方程式を用いて求め、これより山地側を「土砂災害危険領域」と定義した(1)。当手法を現地に適用して妥当な評価が得られれば、土砂災害危険領域を広域的かつ簡便に設定でき、地域防災計画を策定する際の有用な情報として提供できる。

本研究では新潟県十日町市域を検討対象として、伊藤らの手法にならって土砂災害危険領域を設定し、それと新潟県により公表されている土砂災害警戒区域等とを比較して、当手法の妥当性を評価する。

Naomasa HONDA, Natsuki KASUGA (College of Science, Ibaraki University, Bunkyo 2-1-1 Mito Ibaraki 310-8512)
Estimation of sediment hazards zone prediction method based on governing equations of mass point system in mountainous area.

II 質点系の支配方程式に基づく土砂災害危険領域の設定

伊藤らは、山地斜面上の崩土の運動に関する質点系の支配方程式（崩土の重心の運動を追跡する）として、図-1を参考に、崩土の流動過程において侵食・堆積の影響が顕著でないと仮定し、次式を導いた(1, 2)。

$$v \frac{dv}{dx} = g \sin \theta - \frac{(\sigma - \rho)c}{\rho_m h} g \cos \theta \tan \phi_s - \frac{\rho f_b v^2}{\rho_m k h} \quad (1)$$

$$\rho_m = c\sigma + (1-c)\rho \quad (2)$$

$$f_b = \frac{4}{25} \left\{ k_d \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) + k_f \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} \right\} \left(\frac{h}{d} \right)^{-2} \quad (3)$$

ここに、 x は崩土の移動開始地点を原点とする斜面に沿った座標、 h は崩土厚、 v は崩土の移動速度、 c は土粒子の体積濃度、 g は重力加速度、 θ は斜面勾配、 σ は土粒子の密度、 ρ は水の密度、 ρ_m は土粒子と水の混合物の密度、 ϕ_s は土粒子の内部摩擦角、 f_b は崩土の流動抵抗係数、 d は崩土の土粒子の代表粒径、 e は土粒子の反発係数で $e=0.85$ 、 k_d および k_f は定数でそれぞれ $k_d=0.0828$ 、 $k_f=0.16$ である。 k は形状係数で、崩土の斜面方向の長さを ℓ 、同じく断面積を A とすると、次式の関係がある。

$$kh = \frac{A}{\ell} \quad (4)$$

式(4)の右辺は、斜面方向の単位長さ当たり（すなわち質点扱い）の崩壊土砂量であり、崩土の斜面方向の形状が四角形の時には $k=1.0$ 、三角形の時には $k=0.5$ である。

式(1)で崩土の形状(k および h)と物性値(σ 、 ρ 、 d 、 ϕ_s および c)が与えられれば、 θ の変化に対応した v が計算され、図-1において $v=0$ となる地点が崩土停止位置（最長到達地点）となる。具体的には、勾配 30° 以上の表層崩壊可能斜面(3)を抽出し、斜面上の最急勾配地点(図-1の斜面上部の点線部分)で崩壊が発生するものとして、斜面ごとに算出された崩土の停止位置を平面図上で結ぶことにより、土砂災害危険領域が設定される。

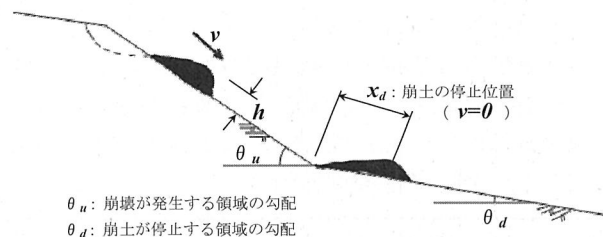


図-1. 山地斜面上の崩土の移動・停止 (模式図)

III 検討対象地域の概要と検討条件

1. 検討対象地域の概要

十日町市は新潟県南部（中越地方）に位置し、2005年4月に旧十日町市他4町村が合併し、現在の十日町市となった。人口は約6万人で、信濃川と渋海川水系沿いに水田が広がる一方、周囲は山に囲まれ、冬には2mから3mの積雪がある日本有数の豪雪地帯である。

十日町市は、後出の図-2に示すとおり、市内の中心を南北に流れる信濃川を東西の山地が囲み、信濃川右岸から東の斜面の裾野に至る平坦地に中心市街地が広がる一方、信濃川左岸と西の斜面は接近しており、集落が点在している。2004年10月の新潟県中越地震では同市域でも死者8名、全壊100世帯、大規模半壊・半壊計1,027世帯等の大きな被害が発生した。このとき、東斜面では山麓部で多数の崩壊や地すべりが発生したが、その影響は市街地までには及ばなかった。一方、西斜面では地すべりが発生し、一部の集落が災害復旧工事期間中、仮設住宅での避難生活を余儀なくされた。

以上より、十日町市においては、東斜面を背にする中心市街地は土砂災害の危険性を潜在的かつ広域的に有し、西斜面では点在する集落が土砂災害の危険性を局部的に有するといえる。

2. 検討条件

ここでは、十日町市市街地の東斜面を検討対象区域とし、崩壊深さ2.0m程度の表層崩壊の発生を想定して土砂災害危険領域の設定を行った。なお、崩土の形状は $k=0.5$ （三角形）、 $h=2.0$ m、とした。

まず、伊藤らにならって、2万5千分の1の地形図上で勾配 30° 以上の崩壊可能斜面を計140箇所抽出し、等高線に直交するように落水線を引き、個々の斜面縦断面を作成した。次に、各斜面の最急勾配地点で崩壊が発生するものとして、式(1)により個々の落水線上において崩土の移動速度および停止位置を求めた。そして、それらの停止位置を平面図上で連ねることにより、その線より山地側の領域を土砂災害危険領域とした(図-2)。

土砂の移動速度は、式(1)を差分法で、斜面上の座標 x 上に存在する速度 v の質点(土砂)に対して、微小区間 Δx の移動量に対応した速度変化 Δv を計算することにより、座標 $(x + \Delta x)$ 上に移動した質点の速度 $(v + \Delta v)$ を逐次計算で数値的に求める。このとき、 $\Delta v / \Delta x$ (式(1)中の dv/dx に相当)を精度よく与える方法として、ルンゲ・クッター法を用いた。同法は1階の微分方程式の代表的な解法であり、計算の安定性が高く、計算精度も良いことから実務計算にも多用されている。数値計算に用いた諸条件は表-1のとおりである。

表-1. 数値計算の条件

崩士の形状	$h=2.0\text{m}, k=0.5$
土粒子の密度	$\sigma=2.65\text{g/cm}^3$
土粒子の内部摩擦角	$\phi_s=39.0^\circ$
土粒子の代表粒径	$d=5.0\text{cm}$
水の密度	$\rho=1.00\text{g/cm}^3$
土粒子の体積濃度	$c=0.40$
差分条件	$\Delta x=0.10\text{m}$

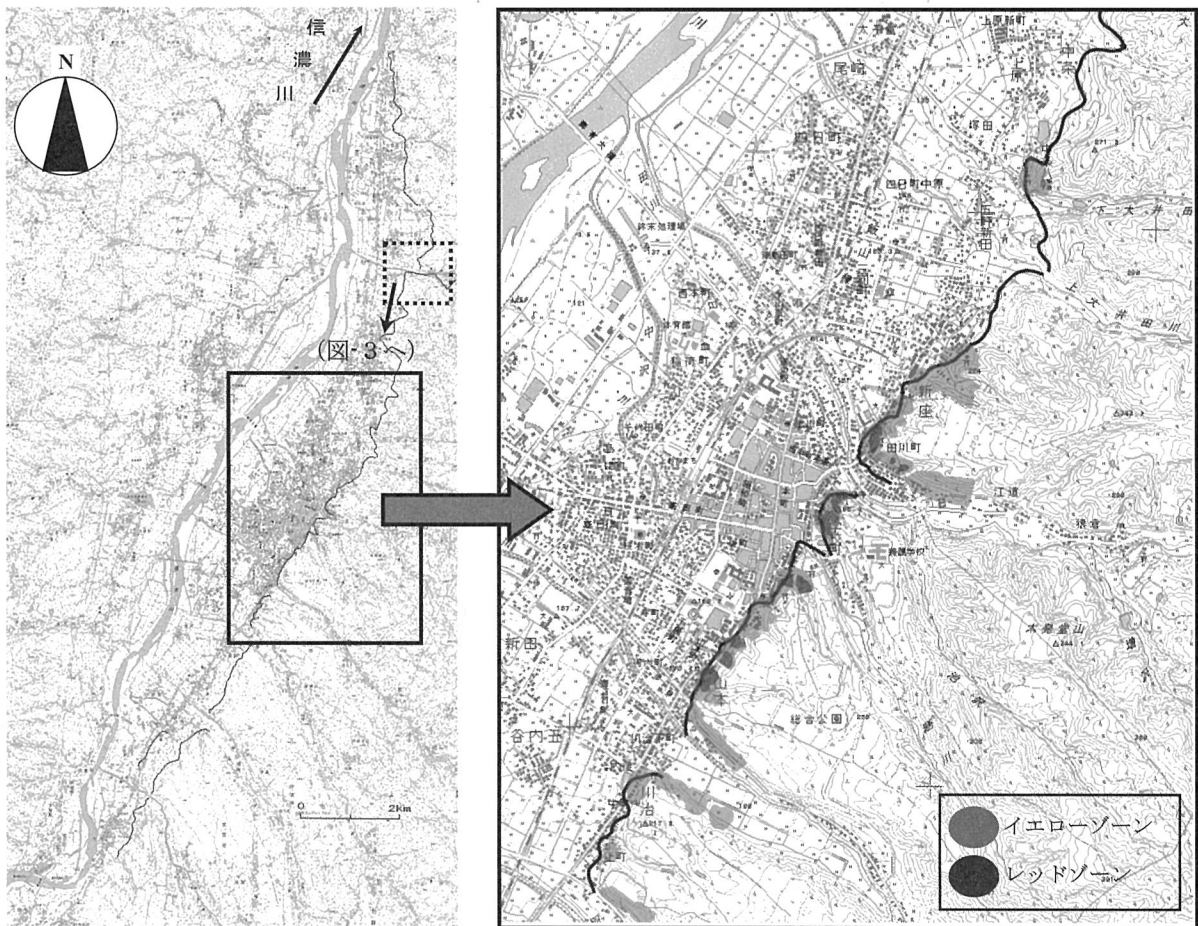
IV 結果と考察

図-2 (a)に東斜面全体の計算結果を示す。同図において東斜面と市街地の間に黒い実線で示されているのが土砂災害危険領域の境界線であり、これより山地側が土砂災害危険領域となる。図-2 (b)は、図-2 (a)の実線枠部分を拡大したものであり、新潟県により公表されているイエローゾーンを●印（薄い灰色）で示し、計算による土砂災害危険領域と比較したものである。これらの図から、イエローゾーンはほぼ計算による土砂災害危険領域内で設定されており、両者はよく一致していることが

わかる。なお、図-2 (b)には参考のため、レッドゾーンも●印（濃い灰色）で記載した。写真-1は、レッドゾーン内にある家屋の一例である。斜面と家屋が近接しており、コンクリート壁によって斜面側が堅固に防護されている様子がわかる。



写真-1. レッドゾーン内にある家屋の一例



(a) 計算による「土砂災害危険領域」の境界線

(b) 計算結果と「土砂災害警戒区域等」との比較

図-2. 計算による「土砂災害危険領域」と公表されている「土砂災害警戒区域等」との比較



図-3. 図-2 (a)中の破線枠部分の拡大図

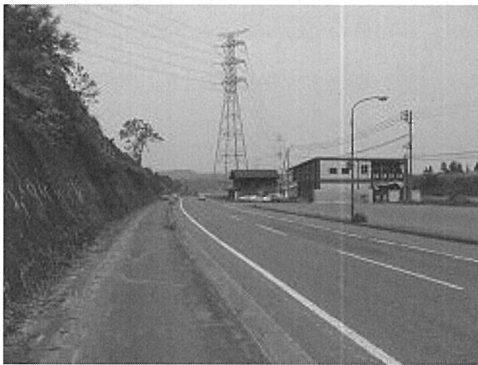


写真-2. 図-3中の防護施設の例(擁壁工)



写真-3. 図-3中の防護施設の例(法枠工)

その一方で、図-2 (a)によれば土砂危険領域とされるが、イエローゾーンには指定されていない箇所も存在する。図-2 (a)中の破線枠部分はその一例であり、それを拡大したものが図-3である。図-3において、道路に沿った斜面では、写真-2や写真-3に示すような擁壁工や法枠工を現地で確認した。そのような一定の対策が施されている区域では、背後に崩壊可能斜面が存在したとし

ても、イエローゾーンの指定は必要ないであろう。このように、当手法による計算結果をふまえて簡単な現地踏査を行えば、土砂災害に対する保全対象（人家、道路等公共施設）と土砂災害危険区域との関係が素早く把握できる。

以上の検討結果から、当手法によって土砂災害危険領域を広域的かつ簡便に設定でき、地域防災計画を策定する際の有用な情報として提供できることについて、一定の妥当性が見出されたと考える。

一方、当手法の課題として、数値計算上の条件設定が挙げられる。本研究で用いた計算条件（表-1）はいずれも標準的な値であって、現実には個々の斜面でそれぞれ固有の値を有する。とくに土粒子の ϕ_s 、 d 、 c の与え方は土砂到達距離に大きく影響し、条件によっては数メートルから十数メートルの差が生じる場合もある。それらの差異は、本研究のように使用する地形図の縮尺を土砂災害危険区域の設定の広域性を重視して2万5千分の1（実距離10mは図上では0.4mm）とした場合には、図上では大きな問題とはならない。しかし、法に基づく土砂災害警戒区域等の設定ではより大きな縮尺の地形図が使用されるため（たとえば2千5百分の1の地形図の場合、実距離10mは図上では4mm）、計算結果の差異が図上での区域設定に及ぼす影響は大きい。そのような場合、現地データに基づいて計算条件の設定を行うなどの慎重な対応が必要である。

V おわりに

当手法によって設定された土砂災害危険領域の災害危険度は一様ではなく、崩壊可能斜面における崩壊の起こりやすさや落水線の密度に依存する。したがって、当手法によって危険領域が広域的に設定された後には、次の段階として、前出の計算条件の慎重な設定と相まって、斜面ごとのより詳細な調査が必要不可欠である。

VI 謝 辞

元 立命館大学教授 江頭進治先生には、土砂移動現象の数値解析に関して日頃より貴重なご助言を賜っている。ここに記して心から感謝の意を表します。

引用文献

- (1) 伊藤隆郭・江頭進治・KAUSHAL RAJ SHARMA (2006) 京都における文化財を含む地域の土砂災害危険領域に関する一考察. 水工学論文集 50:895-900.
- (2) 土木学会編 (1999) 水理公式集:144-145.
- (3) 江頭進治・中 庸充・内田 修 (1996) 斜面崩壊に伴う災害危険度の評価法に関する研究. 砂防学会誌 (新砂防) 49(3):11-19.