■メキシコ東部における地すべり・土砂災害警戒避難基準雨量の検討事例

Elucidation of the warning rainfall criterion against landslide disasters at Eastern Sierra Madre range of Mexico, taking the soil moisture content into consideration

九州大学農学研究院／久保田哲也

Kyushu Univ./Tetsuya KUBOTA

メキシコ・ヌエボレオン州立大学森林科学部／イスラエル・カントウ・シルバ

Universidad Autonoma de Nuevo Leon/Israel CANTU SILVA

九州大学農学研究院／大槻恭一

Kyushu Univ./Kyoichi OTSUKI

キーワード：警戒・避難，雨量，土壤水分，メキシコ，土砂流出，崩壊

Key words : Warning and evacuation, Rainfall, Soil moisture content, Mexico, Landslide, Sediment Runoff

1. はじめに

日本では毎年のように，貴重な人命・資産・資源が土砂災害により失われているが，2005年は，大西洋－カリブ海地域でも強力なハリケーンが数多く発生し，アメリカのニューオーリンズに甚大な被害をもたらしたハリケーン・カトリーナ（Katrina）に代表される記録的な災害を生じる年となった。ここでは，そのようなハリケーンの一つであるハリケーン・エミリー（Emily）により土砂災害が生じたメキシコ北東部のヌエボレオン州（Nuevo Leon）東シエラマドレ山地（Sierra Madre Oriental）現地において，土砂災害時を含む期間の降雨と土壤水分変化の特性を観測するとともに，同時期の九州北部での観測・解析結果との比較を基に崩壊・土砂流出の警戒避難基準雨量を検討したので報告する。

2. 研究対象地

九州北部では，福岡県北東部篠栗町と久山町に位置する九大福岡演習林内（年降水量1790mm程度）において流域の異なる2地区3地点で観測を行った。

メキシコの現地は，ヌエボレオン州々都モンテレー

（Monterrey）に隣接するサンペドロ市（San Pedro）に位置する東シエラマドレ山地チピンケ（Chipinque）森林自然公園内の森林斜面において（図1，写真1，2），九州北部と同様の観測を行った。この地域は一部が半乾

写真－1 東シエラマドレ山地と都市開発状況

図－1 メキシコでの研究対象地位置図

写真－2 東シエラマドレ山地とコナラを主とする森林

燥地気候でもあるが、ハリケーンなどが通過しなかった場合の年間降水量は約400mm、雨季である8月～10月の月間降水量が160mm程度になる地域でもある（久保田 2004）。ところが、ハリケーンや寒冷前線通過など気象条件が整えば、2005年7月、10月のように激しい豪雨となり、土砂災害のほか市街地の洪水も生じる。

地質は、褶曲が発達し脆く、岩質は粘板岩・片岩・石灰岩・集塊岩などから成る。加えて、斜面の都市開発が進み、土砂災害が増加しており、連邦政府関係部局や自治体も開発行為の適正化などに注意を払っている。しかし、都市化に伴う斜面の開発圧力が大変強く、土砂災害と森林環境破壊が強く懸念されている地域である。

3. 観測・調査方法

九州北部・メキシコ現地とも、転倒杓式雨量計およびECH₂O誘電率型土壌水分計にデータロガーを組み合わせて観測を行うとともに、長谷川式貫入試験器などによる土層貫入試験、及び、流出土砂調査などの現地調査を行った。さらに、現地で採取した土壌サンプルを使用して、自然乾燥状態および飽和状態の透水試験を行った。メキシコでは九州大学とヌエボレオン州立大学が共同で設置した雨量計と土壌水分計を用いるとともに現地災害調査も実施した。

観測の精度や観測間隔は、データロガーのメモリー容量の制限から、雨量を10分雨量精度とし、土壌水分量は10分から15分の観測間隔（ロガーにより異なる）とした。

4. 結果

ハリケーンEmily（2005年7月20日～21日）においては総雨量約420mm、日雨量318mm/day、時間雨量39mm/hr、30分雨量21mmを観測した（図2）。これは、現地ではかなりの豪雨と言える（久保田 2004）。この強雨のため、写真3～6のような地すべり・崩壊・土砂流出が生じた。

図ー2 ハリケーンEmily時の累加雨量（最も左の曲線）

出が生じた。

4.1 土砂流出・氾濫

九州北部では、溪流から土砂が溢れ出るような土砂流

写真ー3 モンテレー市街に発生した地すべり

写真ー4 東シエラマドレ山地での土砂流出現場

写真ー5 チピンケ森林公園斜面に発生した崩壊

写真-6 森林公園内道路への土砂流出

出を生じる雨量は2002年～2004年の観測では総雨量で約200mmとなっている(図3)。

ヌエボレオンでは、少なくとも10月の総雨量188mmでは大規模な土砂の流出はないので、190mm程度が災害発生限界となる可能性がある。

4.2 表層崩壊

表層崩壊の発生は勾配や地質の他、斜面土層の土壌水分量と深く関係があるので、降雨後の水分減少率などその観測結果を見ながら警戒基準雨量を検討する必要があると考える。従って、まず土壌水分量と雨量の関係をみると、後述のように、九州北部は鉛直1次元浸透の単純化モデルではほぼ表現できると思われる一方、ヌエボレオンではややばらつきが見かけられる。また、降雨終了後の減水速度は、ヌエボレオンの方がやや遅い。

今年度の雨量観測(図2)からは、土砂災害発生降雨と非発生降雨の分離は容易と思われ、累加雨量による警戒避難基準雨量(森山 2006)の設定可能性が示唆される。ヌエボレオンでは、少なくとも総雨量188mmでは崩壊発生は報告されていないので、約180～400mmが限界となると思われるが、ここでは、水文学的に合理性の

図-3 九州北部小溪流からの土砂流出警戒雨量の例
(曲線は限界線CLで、破線は日雨量Pdに対するもの、実線は時間雨量Piに対するもの。曲線より上が発生降雨、添字でDebrisは発生、Nonは非発生、CLは限界線の意味。)

高い最大累加雨量を用いる手法(森山 2006, 川原 2006, 松村 2006)による将来の解析も念頭におき、累加雨量による検討を行った。

観測によれば、この地域では、降雨終了後の土壌水分の減少について地質の類似した九州北部の研究対象地域(福岡県北部、中生代・古生代の粘板岩と片岩類から成る、写真7)に比べて、「初期減少速度」も遅く、「半減期」も大きいことが観測されている(図4, 図5)。つまり、降雨の土質強度低下や地下水位上昇への影響が比較的長時間続くことが考えられる。このことは警戒避難基準を考える上では重要な点と思われ、土壌水分変動と災害発生の関係を十分に把握しなければならないが、詳しくは後述の考察で検討する。

4.3 地すべり

地すべりに関しては深い地下水やすべり面特性の検討

30分雨量と土壌水分量の関係 (Nuevo Leon, Canoas)

図-4 調査斜面の土壌水分量変化の例
(ヌエボレオン、図中の棒グラフは30分雨量)

30分雨量と土壌水分量の関係 (Ochozo)

図-5 比較対象調査斜面での雨量と土壌水分量変化の例 (九州北部・福岡演習林)

写真-7 比較対象流域の例 (九大福岡演習林)

が必要であるが, 上記のような総雨量400mmにも上る降雨では, 今後も, 亀裂の多い石灰岩の緩斜面を中心に写真3に類する地すべりが発生する可能性があるものと思われる。

5. 考察

5.1 土砂流出

土砂流出については, 氾濫が生じるかどうかが重要で, 溪流内を無事に流下して溪流内で堆積すれば問題はない。その観点から, 風倒木被害地や特殊な大規模崩壊起源の土石流を除いて, ヌエボレオンでも図3の九州北部と同様の手法により氾濫警戒基準雨量が設定可能と思われる。すなわち, この場合は主として掃流状集合流動または掃流土砂と思われるが, ある土砂流出量を超えると, 土砂が溪流より氾濫すると考えられる。そこで, 地中の水分条件も考慮に入れた流出解析手法に基づく既往の研究(平野 1992)による次式(土砂流出量式)を用いる。

$$Q/A = M \cdot P_i \int (P \cdot \cos \alpha) dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで, Q : 土砂流出量, A : 流域面積, M : 溪流堆積物の土質に関する係数, t : 時間, α : 溪床勾配, P : 流出時間内降雨量, P_i : 時間雨量。降雨継続時間内積分は,

$$\int (P \cdot \cos \alpha) dt = P_a \cdot \cos \alpha$$

P_a : 総雨量, これから

$$Q/A/M/\cos \alpha = P_i \int P dt = P_i \cdot P_a \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{従って, } P_i \cdot P_a = \text{Const.} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$Q \geq Q_c$ の時, 土砂流出が生じるとすると, Q_c は氾濫限界土砂流出量となり,

$$Q_c/A/M/\cos \alpha = P_{ic} \cdot P_{ac} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{結局, } P_{ic} \cdot P_{ac} = \text{Const.} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで, P_{ic} , P_{ac} はそれぞれ氾濫発生限界雨量。

この式は, P_{ic} に関していわゆるパワー則となっており, 土砂流出量の大きさとそれに関連する雨量が自己組織化するように働く自己組織化臨界状態仮説(Bak 1996, Hergarten 2002, 久保田 2002)から導かれる式の型と一致する。

理論的には整合性を欠くきらいはあるが, 本稿では, 実用上の参考のため P_i の代わりに最大日雨量 P_d を用いた検討も行っている。

図3の例で, (5)式の右辺を, 観測結果の判別分析により求めると, その判別関数の係数より約8000(九州大学森林保全学研究室HP(2006): <http://ffpsc.agr.kyushu-u.ac.jp/control/Ochozu.html>)となる。また, メキシコ・ヌエボレオンでは, 2005年10月の総雨量124mm, 最大日雨量98mm, 最大時間雨量23mmで, 下流の洪水とごく少量の土砂流出が生じたことも勘案して, 仮の限界線を上記の式に当てはめて検討すると, (5)式右辺の定数は, 日雨量に対して約15000, 時間雨量に対して, 約3750となる(図6)。

この他, 初等カストロフ理論(Elementary Catastrophe Theory:ETC)に基づく, やや直線的な限界線を設定する手法もある(久保田 2002)。ただし, 先行降雨の影響を評価するために, 従来は実効雨量(瀬尾ら 2001)を使用している。しかし, この件に関しては, 実行雨量が単位図法の一種で単位図の決定には一般的に困難を伴うことや連続式を満足していないと言う理論上の問題点が指摘されている(森山 2006)上に, ここで使用する

土砂流出の有無と総雨量と最大時間雨量または最大日雨量の関係

図-6 ヌエボレオンでの土砂流出警戒雨量設定試行の例(図3と同じく, 曲線は限界線CLで, その上が発生降雨。凡例でPdやPiの後に続くDisasは発生, Nonは非発生の意味。)

手法は、先行降雨の影響も勘案できる斜面からの流出解析に基づいており、実効雨量と理論的に整合性がない。従って、ここでは実効雨量は採用しない。

5.2 表層崩壊

表層崩壊に関しても、今後の観測の継続により土壌水分量変動の影響を勘案した警戒避難基準雨量が得られると思われる。ただし、土壌水分量の減少速度が、比較対象の九州北部よりも小さいので、降雨が続く場合は注意を要するが、この件は以下にも考察する。

まず、土壌水分変化量 $\Delta\theta$ と雨量 R との関係を検討する。地下水の流れを表わすDarcy則を拡張した不飽和浸透のRichards則では、連続の式は下記ようになる（例えば塚本編 1992）。

$$\partial\theta/\partial t = -\partial q_x/\partial x + \partial q_z/\partial z \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 θ は体積土壌水分率、 t は時間、 q_x と q_z は x 方向と z 方向の不飽和帯からの単位面積当たりの供給水流量（土壌水分変動量）、 x は斜面方向座標、 z は斜面垂直方向座標。

表層崩壊を対象に、降雨時の地表に近い場所を検討しているので、地表の浸透能が降雨強度よりかなり大きいこと（塚本編 1992）を考慮し、 x 方向の流れが z 方向のものより十分小さい1次元鉛直浸透を採用する。その場合、下式が成立する。

$$\partial\theta/\partial t = \partial q_z/\partial z \quad \dots\dots\dots(7)$$

このとき運動方程式は、次式となる（平松 2006）。

$$q_z = -K \cdot \partial\phi/\partial z + K \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中の K は透水係数、 ϕ は（土壌水分吸引）圧力水頭である。

(7)式を差分化して変形・整理すると下式ようになる。

$$\Delta\theta \cdot \Delta z = \Delta q_z \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここでは、岩盤が地表に近い地域を対象としているので、降雨浸透のおおよその挙動を知る目的で、 Δz に難

透水性地盤までの深度を考えることにする。すると、地表からの q_z は降雨量 R であるのに対し、難透水性地盤での q_z は、 K が極めて小さいので、(8)式より $q_z \approx 0$ となる。従って、その差である Δq_z は、 $\Delta q_z = (\text{流入量}) - (\text{流出量}) \approx R - 0.0 = R$ となる。もちろん、降雨時間とともに土層は飽和するし、それとともに x 方向への流れや地表流も生じるから、この関係はいつまでも維持されないが、少なくとも飽和するまでは続くと仮定する。その場合、(9)式から、近似的に次式が成り立つ。

$$\Delta\theta \cdot \Delta z = R \cdot \Delta t \quad \dots\dots\dots(10)$$

この場合、 Δz は地表から難透水性地盤までの平均的深さで、地域によって異なる係数として扱うものとする。また、時間差分 Δt が1時間であれば、1時間の降雨 R は時間雨量であり、 Δt が30分であれば、 R は30分雨量となる。また、(9)式が成立するような場合は、 $\Delta\theta$ と雨量 R （時間雨量または30分雨量など）は直線関係にある。対象地域では、雨量観測を10分間隔、土壌水分量観測を10分から15分間隔で実行しているので、 R としては、そのどちらにも対応できる最小時間間隔の30分雨量を用いて検討した。

すると、図7、図8のように、 $\Delta\theta$ （縦軸）と R （横軸）が正比例の関係を持つように見える。この直線関係で、相関係数が1.0に近いほど上記の(10)式の状態に近いと考えられる。明確ではないが、九州北部の場合は、降雨の浸透は1次元不飽和鉛直浸透を単純化した線形モデルで表現できる可能性もある。

一方、図4のように、土壌水分から見れば、10月は比較的土壌水分が多く悪条件であったのに崩壊は生じておらず、土層がかなりの乾燥状態であった7月のハリケーンによる降雨では崩壊が生じた事実から、土壌水分量は雨量ほど崩壊発生に影響がないのかも知れない。ただし、ヌエボレオンの例では、崩壊発生時の土壌水分量ピーク値は非発生時とほぼ同じだが、飽和に向かう増加速度がかなり大きい。従って、この水分増加速度も発生基準となり得る。また、先行雨量の影響を考える場合、

図ー7 土壌水分のレスポンスの例（ヌエボレオン）

図ー8 比較対象での土壌水分のレスポンス例（九州北部）

降雨後における土壌水分量の減少傾向を把握しておく必要もある。現地サンプル試験から求めた透水係数は、自然乾燥状態ではヌエボレオン（Chipinque自然公園）のものが九州北部（福岡演習林）より大きく、前者 10^{-1}cm/s オーダーに対して後者は 10^{-2}cm/s オーダーと10倍異なる。飽和状態では、前者・後者ともに 10^{-3}cm/s オーダーである。このことから図4、5のように雨の降り始めの土壌水分増加はメキシコが九州北部（福岡）より数倍早く、降雨終了後の土壌水分減少速度は同じかメキシコがやや遅くなるものと思われる。

いずれにせよ、これらの地域では、雨量の増加は、土壌水分の増加と関係し、警戒避難の指標となると考えられる。また、今回のデータに限れば、後述の図9、10のように累加雨量を用いれば、災害発生雨量と非発生雨量の分離も良好のように見える。

上記のように、ヌエボレオンでの警戒避難基準は雨量のみで表現できる可能性が高いが、その基準雨量は、4.1に前述のように200mm程度とも思われる。これを確認するためには、キネマティックウェーブ法に基づく先述の最大累加雨量を用いる手法（森山 2006, 川原 2006, 松村 2006）を用いて検討するのが本来ではあるが、実用化する上で、最大累加雨量の概念が現地技術者に理解し難いことから、まずは、累加雨量を用い、先述の土壌水分変化率と雨量との関連、およびその変化率（増加速度）の大小を考慮して基準雨量を推定した（図9）。

この手法では、次のように判定を行う。

- ①経過時間が30時間程度で非発生降雨上限が変曲点

ヌエボレオンにおける累加雨量による基準雨量解析
(Disaster: 災害発生雨量, Non: 非発生雨量)

図－9 ヌエボレオンでの崩壊など警戒雨量設定試行例

横軸は降り始めからの経過時間。凡例で、太線Disasterは発生雨量、Nonは非発生雨量。非発生雨量の上限はNon1で、経過時間が30時間程度で曲線の傾きが緩くなるのが分かる。この時間に対応する縦軸の発生下限雨量180～200mm程度が限界雨量 R_c となる。

(変緩点)を持ち、この寸前までが降雨強度 R が強い、つまり図7と8のように、 R に比例して土壌水分増加速度 $\Delta\theta$ も最大であることに着目する。

- ②対応する縦軸の発生雨量線の勾配は非発生雨量曲線のそれとほぼ同じである。
- ③経過時間30時間では発生下限線（発生雨量線）は累加雨量180～200mmに達している。
- ④これが、限界雨量 R_c （ほぼ崩壊発生率100%）となる可能性がある。
- ⑤故に、この場合 R_c は、180～200mmと判断する。

同時に最大累加雨量を用いる手法では、最大累加雨量曲線上の主な変曲点に相当する「発生・非発生の差が最小となる点」を考え、それに相当する雨量が限界雨量 R_c となる。図10のように、非発生雨量の上限である図中Non1の累加雨量を見ると、斜面表面への地下水の到達時間 T （横軸）が約5～6時間で、限界雨量 R_c が150mm程度（縦軸）となる。ただし、この場合、土壌水分データとの関係で、雨量の時間分解能は30分とした。また、今回の解析時には発生データが1つしかないことから、これはあくまで試行値である。ちなみに、 T は、国内での研究における5時間～10時間（森山 2006, 松村 2006）と比較してほぼ同様の値を取る。ただし、この手法は飽和発生モデルに基づいているので、サクシオンによる見かけの粘着力の低下が問題となる浅層崩壊に適用する場合には、精度が落ちる心配がある。

5.3 地すべり

狭義の地すべりは1件しか発生しておらず、またその発生と地下水との関係も複雑なので、基準雨量が設定可能かどうか目下のところ不明である。ただ、先に述べた

ヌエボレオンにおける最大累加雨量による基準雨量解析
(Rdisas: 災害発生雨量, Rnon: 非発生雨量)

図－10 最大累加雨量を用いたヌエボレオンでの崩壊など警戒雨量設定試行例

横軸は降り始めからの累加時間。凡例で、太線Disasterは発生雨量、Nonは非発生雨量。非発生雨量の上限はRnon1で、累加時間が5時間程度で発生降雨との雨量差が最小となるのが分かる。この時間に対応する縦軸の発生下限雨量150mm程度が限界雨量 R_c となる。

ように、今後も類似地質の斜面で発生する可能性はあるので、斜面開発の自粛と豪雨時の警戒が必要と言える。

6. 結 語

九州北部と比較して検討した結果、メキシコ東部のハリケーン災害などについても、土砂の流出・崩壊に対する基準雨量の設定の可能性を見出せた。

- 1) 土砂流出・氾濫については、土砂流出量の式を用いて、九州北部と同様な警戒・避難基準が策定できるものと思われる。
- 2) 崩壊・土石流などについても土壌水分量の増加速度を加味した累加雨量を用いた手法及び理論的な最大累加雨量を用いる手法により警戒・避難基準が策定できるものと思われるが、今回のデータの範囲では、簡便で実用的な前者の手法でも R_c の精度はあまり変わらなかった。

最大累加雨量を用いた手法での解析の継続が必要と思われるが、この手法は土石流だけではなくその他の土砂流出にも有効とされているので、将来はこの手法のみで、運用可能と考えられる。

- 3) 土壌水分量は、雨量の増加に伴い、正比例のかたちで増加する特徴を持つことが考えられるが、その降雨終了後の動態については観測を継続し、検討する必要がある。
- 4) 地すべりに関しては、既に発生した地すべりの変動状況と雨量の関係を検討して行く必要がある。

今後も、土壌水分の変動も含めた観測の継続により、警戒・避難基準の設定に向けて検討を進めたい。

最後に本研究の遂行に対し多大な協力をいただいたサンペドロ市都市開発環境部のホルヘ・ガルサ主任技師お

よび消防局レスキュー隊、及びサンペドロ市長、メキシコ連邦環境天然資源省ヌエボレオン支局長各位に記して感謝する。なお、本研究・調査の一部は平成17年度及び18年度科学研究費補助金・基盤研究(B)課題番号17380097により行った。

引用文献

- Bak, Per (1996): How nature works, Springer-Verlag, New York, pp.65-174.
- Hergarten, Stefan (2002): Self organized criticality in earth systems, Springer-Verlag, Berlin, pp.163-188.
- 平松晋也 (2006): 表層崩壊の発生予測手法, 「土砂災害の警戒・避難システム」九州大学出版会, pp.153-202.
- 平野宗夫 (1992): 土石流の発生予測と流出解析, 土砂移動現象に関するシンポジウム概要集, pp.23-38.
- 川原恵一郎 (2006): ソフトプログラミングと土砂災害基準雨量, 「土砂災害の警戒・避難システム」九州大学出版会, pp.116-123.
- 久保田哲也 (2004): メキシコ東部ヌエボレオン州の東シエラマドレ山脈における山麓開発と砂防, SABO80, 砂防地すべり技術センター, pp.4-9.
- 久保田哲也, 大槻恭一, 脇水健次 (2004): 山地災害の警戒・避難基準に使用する観測雨量及びインターネット降水短時間予報値の役割と地域的誤差, 平成16年気象学会秋季大会研究発表予稿集, p78.
- 久保田哲也 (2002): 総観規模~メソスケール気象条件を用いた土砂災害の広域的予測-梅雨と台風の場合-, 砂防学会誌, Vol. 55, No. 1, pp.4-14.
- 松村和樹 (2006): 新たな土砂災害予測システム, 「土砂災害の警戒・避難システム」九州大学出版会, pp.270-279.
- 森山聡之 (2006): 次世代警戒・避難雨量システムの考え方, 「土砂災害の警戒・避難システム」九州大学出版会, pp.124-134.
- 瀬尾克美, 原口勝則, 菊井稔宏, 吉田真也 (2001): 土砂災害警戒避難基準雨量の課題と改良について, 砂防学会誌, Vol. 53, No. 6, pp.37-44.
- 塚本良則編 (1992): 森林水文学, 文永堂出版, pp.102-157.
(原稿受付2006年8月4日, 原稿受理2007年2月2日)