土石流構造物対策を要する渓流の抽出のためのリスクマッピング手法の開発

西尾陽介[1]・溝口昌晴[1]・下田義文[1]・越智英人[2]・林 孝標[3]

[1]八千代エンジニヤリング株式会社（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）
[2]中国地方整備局河川部【前JICA派遣専門家】（〒730-8530 広島市中区上八丁堀6-30 広島合同庁舎）
[3]ブラジル連邦共和国 統合地域開発省【JICA派遣専門家】（St. de Grandes Áreas Norte 906 - Asa Norte, Brasília - DF, 70655-775）

ブラジル連邦共和国では、2011年1月豪雨時に発生した多数の土石流災害を契機として、土石流対策の能力向上に関する検討を進めている。この技術協力プロジェクトの中で、リソースが限られる海外の市政府技術者でも、土石流対策箇所の整備優先度を評価するための簡易リスクマッピング手法を提案した。提案した手法は、日本の土砂災害防止法の考え方を基本とし、無償の公開データから、QGISの水文解析を活用した設定を行うこととし、本プロジェクトのパイロット市を対象として検証した結果、土石流対策の整備優先度が高い渓流を抽出できることを確認した。

Key Words ： *土石流、砂防堰堤、リスクマップ、優先度評価、ALOS全球数値地表モデル*

１．はじめに

ブラジル連邦共和国では、2011年1月の豪雨によってリオデジャネイロ州を中心として多数のフラッシュフラッドや土石流が発生し、行方不明者約400名、死者900名を超え、約2万人が家を失うというブラジル史上最大の被害をもたらした。連邦政府はこの災害を契機として多年度計画プログラム「災害リスク管理・対応プログラム」を策定し、土石流対策の能力向上に関する検討を進めている。

本報告では、JICAプロジェクト「強靭な街作りのための土砂災害構造物対策能力向上プロジェクト」（以下、本プロジェクト）として、土石流対策に関する技術協力のうち、砂防堰堤整備箇所を選定することを目的とした簡易リスクマッピング手法について報告する。

２．背景

ブラジル側へのヒアリングの結果、市政府は土石流構造物対策の整備優先度が高い渓流を市域全体から客観的な手法で抽出できる手法を求めている一方、予算や人的リソースの成約があり、高価なソフトウェアや高度なデータを用いた解析手法の導入には困難を感じていることが明らかとなった。そこで日本の土石流特性とブラジル国の土石流特性が類似していることを確認した上で、市政府が入手可能な無償のGISソフトウェア、数値標高データ及び統計データを用いて、日本の土砂災害防止法に基づく基礎調査の設定手法をベースとした土石流構造物対策の整備優先度が高い渓流の抽出に目的を特化した簡易リスクマッピング手法及び整備優先度評価手法を提案した。

図-1 2011年豪雨によるテレゾポリス市土石流災害
（出典：統合地域開発省提供）

３．ブラジル国の土砂災害特性

(1) これまでに発生した土砂災害

ブラジルでの最も古い土砂災害記録は、1928年にサンパウロ州サントス市で発生したものであるが、80人の犠牲者があったという情報の他は、詳細な記録は残っていない[1)]。近年発生した代表的な土石流災害は、2011年1月にリオデジャネイロ州の山岳地域にあたるノバフリブルゴ市、ペトロポリス市及びテレゾポリス市で発生した災害である。中でもテレゾポリス市では、雨期に入ってから100mm/日を超える降雨が複数回記録されており、2011年1月災害時にプリンシペ川等で大規模土石流が発生し、572人の死者行方不明者が出た（図-1）。

(2) 土砂災害発生地域の特性

ブラジル国の自然災害に関する統計データであるブラジル災害デジタルアトラスの1991年から2021年までの土砂災害の発生件数を分析した結果、ブラジル南東部地域のサンパウロ州、ミナスジェライス州、リオデジャネイロ州が際立って多く、次いで南部地域のサンタカタリーナ州、南東部地域のエスピリトサント州で多い（図-2）。これらの州はいずれもブラジル国の南東部から南部にかけてのSerra do Marと呼ばれる山岳地域に位置する州であり、土石流災害リスクが高い。

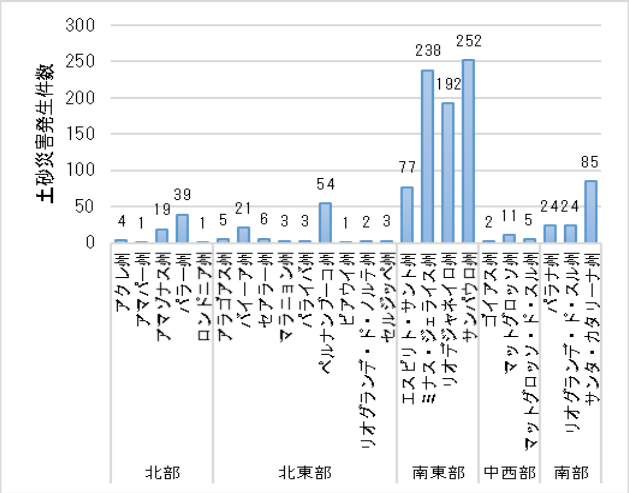

図-2 土石流災害の発生リスクが高い地域

(3) 土石流災害の特性

2011年1月災害の土石流発生箇所の調査結果データを分析した結果、以下の土石流発生特性が得られた（図-3）。

【流域面積】土石流災害は流域面積0.01km^2～5km^{2}の渓流で発生している。

【渓床勾配】土石流災害は流域内の最急渓床勾配が10°以上の渓流で発生している。

【氾濫状況】土石流の氾濫開始点の渓床勾配は2°～15°の区間で氾濫しており、特に5°≦θ<10°の区間が多い。また、土石流の到達末端の渓床勾配は1°～4°の区間であり、特に2°≦θ<4°の区間が多い。

上記の結果から、ブラジル国の土石流災害の特性は、日本の土石流の一般的な傾向と類似した傾向を示すことが明らかとなった。

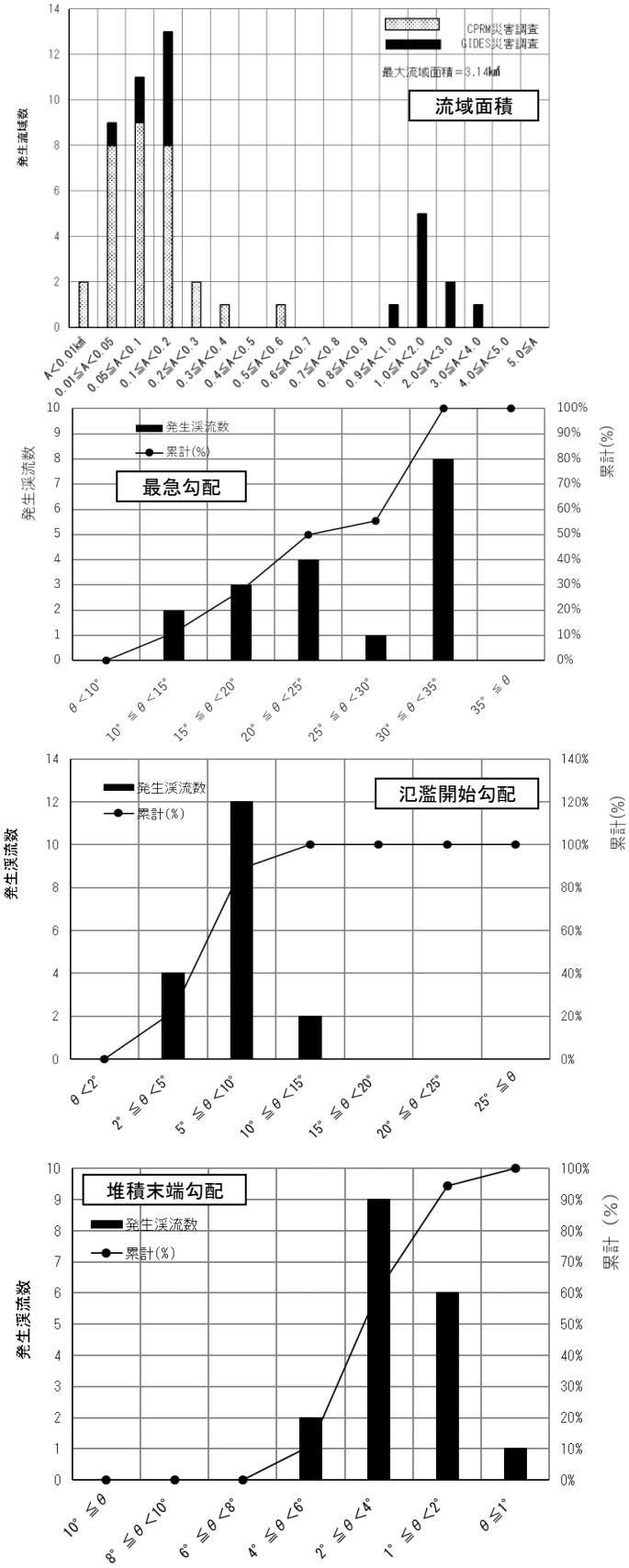

図-3 ブラジルの土石流災害特性（2011年1月災害）

（ブラジル地質調査所（CPRM）調査結果より作成）

４．簡易リスクマッピング手法

(1) 使用するデータ

州政府及び市政府では、土砂災害対策に投入できる予算は極めて限定的であり、高度な技術を持つ技術者も少ないことが明らかとなっている。そこで、砂防施設の整備優先度が高い箇所を抽出するための簡易リスクマッピングでは、オープンソースのGISソフトウェアであるQuantum GIS（QGIS）を使用し、解析に用いる地形データは、JAXAが無償で公開しているALOS全球数値地表モデル (DSM) "ALOS World 3D-30m (AW3D30)"を活用することとした。

(2) マッピング手法

AW3D30を入力データとし、GISの水文解析ツールを使って、河川ネットワーク及び谷次数の解析を行い、対象エリアの水系網を作成する。なお水文解析にあたって、2011年災害で土石流発生が確認された渓流が抽出可能か確認した結果、集水面積が0.065km^{2}程度以上であれば、1次谷以上の河川を有する渓流として抽出できたことから、集水面積が0.065km^{2}以上の渓流を土石流構造物対策整備優先度の検討対象とした。

抽出された水系網から、砂防基本計画策定指針[2)]及び土砂災害防止法基礎調査の考え方に準拠し、土石流流送区間と堆積区間の境界である渓床勾配10°もしくは谷出口から、堆積区間の末端である渓床勾配2°までの区間をGIS上で設定する（図-4）。ここで、2011年災害では流下幅100m未満の土石流が多かったことから、当該区間の両岸50mをリスクエリアとして設定するものとした。

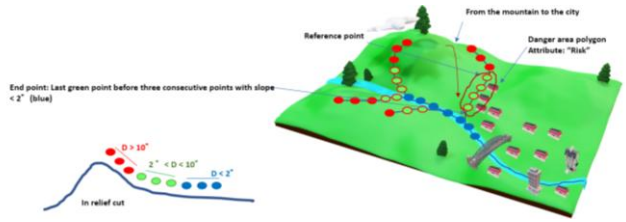

図-4 水文解析による評価対象区間の設定[3)]

(3) 優先度評価手法

ブラジル国の国勢調査データを用いて、設定されたリスクエリア内に含まれる保全対象を抽出することで、土石流の被災リスクを有する保全対象数量を算定する。

優先度評価は、簡易リスクマッピングにより設定されたリスクエリア内に含まれる保全対象の種別毎に偏差値を求め、保全対象毎の偏差値の合計値を比較し、整備優先度評価を行うものとした。本プロジェクトのパイロットサイトでは、建物数（人家戸数）、学校、病院、災害履歴を指標とした。なお、偏差値は以下の式から求めた。

$$T_i = \frac{10(x_i - \mu_x)}{\sigma_x} + 50$$

$$\mu_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu_x)^2} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} {x_i}^2 - {\mu_x}^2}$$

ここで、T_i：偏差値、x_i：データの各値、μ_x：平均値、σ_x：標準偏差である。

ここで上記手法を用いて、パイロット市の一つであるノバフリブルゴ市（リオデジャネイロ州）を対象として、対策優先度が高い渓流を抽出した結果、2011年災害で土石流災害が発生した渓流が上位に抽出されることを確認した（図-5,表-1）。

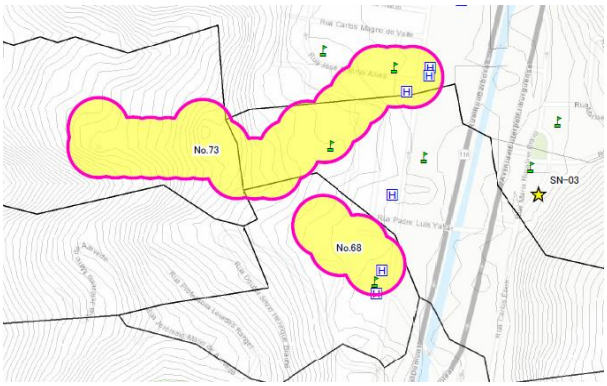

図-5 リスクエリア設定事例（ノバフリブルゴ市）

表-1 簡易リスクマッピングによる対策優先度が高い渓流の選出結果（ノバフリブルゴ市）

順位	No		Edifícios		População		Hospitais	Escolas de todos os tipos	Total dos valores de desvio	災害発生年及び死者数
		NOME_2	Posição	Soma	Posição	Soma				
1	No. 73	Anchieta	9	31	9	130	3	2	282.15	2011(無被害小規模)
2	No. 40		2	255	2	1071	0	4	266.68	×
3	No. 55	America	6	129	6	542	1	2	235.34	2011(無)
4	No. 68		10	29	10	122	2	1	229.17	2011(無、被害小規模)
5	No. 52		3	246	3	1033	0	2	223.89	×
6	No. 2		1	308	1	1294	0	1	214.19	×
7	No. 104	Sao Lucas	7	88	7	370	1	1	207.52	2011(20人) 2002（不明）
8	No. 108		8	87	8	365	1	1	207.35	×

５．ブラジル国内での水平展開

提案した簡易リスクマッピング手法及び整備優先度評価手法を基本として、統合地域開発省職員及び市政府職員が、実際に土石流構造物対策の整備優先度が高い渓流の抽出及び保全対象数に応じた整備優先度評価を行う手順を確認した。その上で、その手法を水平展開するためのマニュアルを統合地域開発省職員及び市政府職員が中心となって作成した。手順の標準化及びマニュアル作成にあたっては、日本側専門家、統合地域開発省職員、パイロット市政府職員からなるワーキンググループを立ち上げ、週1回WEB会議を開催し、各自が実際に設定作業を行った結果を踏まえて質疑応答や改善点について協議を行った。その際に、ブラジル側の実態に応じて実現可能な手順やマニュアル記載内容を検討した。マニュアルの作成言語はポルトガル語であったが、同

時に日本語訳も作成し、記載内容について日本側・ブラジル側双方が確認できるようにした。

作成したマニュアルを統合地域開発省HPに公開する（図-6）とともに、ブラジル国内の大学教授や連邦政府関係機関及び州・市政府向けの技術セミナーにおいて簡易リスクマッピング手法の紹介、WGメンバーを通じた他市への簡易リスクマッピング手法の技術移転等を行い、土石流構造物対策の整備優先度評価手法について水平展開を進めている。

図-6 統合地域開発省簡易リスクマップマニュアル[4)]

６．まとめ

(1) 今後の展開

統合地域開発省及び市政府へのヒアリング結果から、現地政府が土砂災害対策事業を展開するにあたって、整備対象箇所の選定理由について技術的根拠をもって説明することに苦慮している意見が得られた。こういった状況は、ブラジル国に限らず、土砂災害対策を展開する国であれば、どの国においても課題となる部分である。

今回提案した手法は、日本の土砂災害防止法の考え方を基本とし、QGISと無償のデータ（AW3D等）や手持ちのデータを活用することで、リソースが限られる海外の市政府技術者でも、技術的に整備対象箇所を選定することが可能な手法となっており、砂防事業の技術移転のメニューの一つとして有効なツールになると考える。さらに近年の気候変動に伴い、これまで土砂災害が少なかった地域においても、豪雨による土砂流出災害が課題として顕在化する状況にあり、土石流対策の整備優先度評価のニーズは今後さらに高まってくるものと考えられる。

なお2022年2月に発生したペトロポリス市（リオデジャネイロ州）の土砂災害の実績を検証材料として、急傾斜地の崩壊についても土砂災害防止法基礎調査の考え方に準拠した簡易リスクマッピング手法を立案し、GISを活用してリスクエリアの評価が可能となるようマニュアル化を実施しており、今後土石流と急傾斜地の崩壊の2つの土砂移動現象について簡易リスクマッピングの水平展開が可能となっている。

また、GISの水文解析による谷次数区分図作成は、計画対象土砂量の算定にも活用可能であり、リスクエリアの設定だけではなく、砂防計画の基礎資料作成にも応用できることから、本プロジェクトにおいても活用している状況（図-7）である。

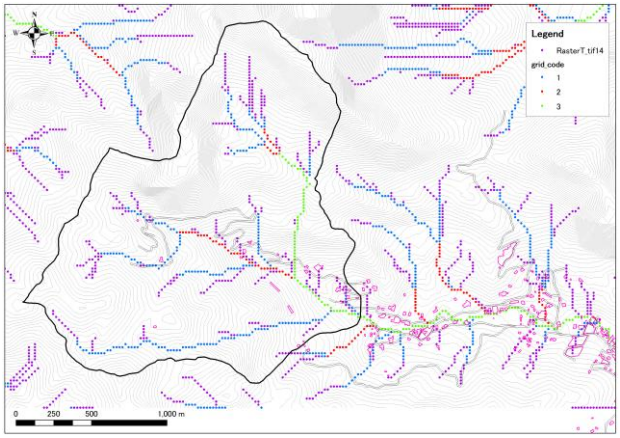

図-7 水文解析による谷次数区分図作成事例

(2) 展開にあたっての課題

①簡易リスクマッピング手法の展開にあたっては、相手国の過去の土石流災害実績から、日本の手法の適用性やリスクエリアの範囲の妥当性の検証が必要であり、対象国の地形、地質、降雨特性、規格、土石流災害実態等に関する類似点や相違点を理解した上で展開を行うことが重要である。

②砂防は経験工学であることから、簡易リスクマッピング手法の展開と同時に、土石流に関する日本の豊富な事例やデータを活用し、土石流という現象に関する流下特性や氾濫特性に関する知識を合わせて提供していくことが重要である。

③保全対象数量を集計して整備優先度を評価することから、保全対象のGISデータは必要となる。こういったデータが整備されていない発展途上国においては、保全対象の基礎データ作成もあわせて求められる点に留意が必要となる。

④解析に用いる基図にJAXA AW3D30mを用いたが、地形データは国、州等のレベルで整備されており、現地のデータ整備状況を踏まえた適用も留意事項となる。例えば、ブラジル国ではCBERS（China-Brasil Earth Resources Satellite）も候補となった。

参考文献

1) W.A. Lacerda, A.L. Coelho Netto, A.M. Sato (2019): Technical report on landslide related disasters in Brazil, Slope Safety Preparedness for Impact of Climate Change, ISBN 9780367885533, CRC Press, pp.44-70
2) 国土技術政策総合研究所資料 No.904：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）解説，2016年4月
3) Rafaelら (2022)：The elaboration of a mapping of debris flows in Brazil, aiming at the installation of SABO structures, 砂防学会研究発表会概要集
4) ブラジル連邦協和国 統合地域開発省ホームページ _PROJET SABO （https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/）