

谷密度を活用した流域別土砂災害危険度評価手法の検討

Drainage Density and Rainfall Intensity as Slope Failure Susceptibility Index in Small Catchment Area

木下博久 Hirohisa KINOSHITA (復建調査設計(株))
中井真司 Shinji NAKAI (復建調査設計(株))
長谷川修一 Shuichi HASEGAWA (香川大学)



近年、集中豪雨による土砂災害が頻発し、各地で多大な被害が出ている。特に最近は、線状降水帯のような局所的で急激な降雨形態により、集団発生的な斜面崩壊もみられる。土砂災害の被害を軽減するためには、土砂災害発生の「場所」と「時間」を予測できることが理想である。本論では、斜面の谷密度に着目し、流域別の崩壊発生頻度や斜面崩壊発生時の雨量強度との関係性を検討した。この結果、谷密度が高い流域ほど斜面崩壊頻度が高く、少ない雨量で崩壊に至るなどの関連性が認められ、谷密度が土砂災害危険度評価の有効な指標の1つとなり得る可能性が示された。

キーワード：谷密度，地形解析，斜面崩壊，雨量指標 R' (IGC：A-01, B-09)

1. はじめに

日本の山地流域の浸食と土砂生産は、斜面崩壊に大きく起因するとされ¹⁾³⁾など、谷地形は斜面の崩壊から開析に至る過程の一形態である。谷密度 (Dd : Drainage Density) とは単位面積あたりの水系 (谷線) の発達程度を表す地形量の1つである。これまで、谷密度の高低と斜面崩壊特性との間に関連性があることが指摘されており、例えば、Onda (1993)⁴⁾ は、古生層地域と花崗岩類地域における水理地質構造の違いに着目し、中古生層地域では崩壊数が少ないのに対して、花崗岩類地域では崩壊数が多いこと、中古生層地域で谷密度が低く、花崗岩類地域で谷密度が高いことを報告している (図-1)。また、長谷川ほか (2008)⁵⁾ は、瀬戸内沿岸の丘陵斜面では表層崩壊が多発し、四国山地の大起伏山地で大規模崩壊が発生する理由として、両地域の斜面構成物質の水理地質構造が異なることを示し、谷密度が豪雨等による斜面崩壊規模の有効な指標となる可能性を指摘した。すなわち、谷密度が高い地域では降雨により小規模な崩壊が多発するのに対し、谷密度が低い地域では、より大きな降雨 (強度) になったときに大規模な崩壊が発生するとした。

本論では、既往の土砂災害を対象に、流域の谷密度と斜面崩壊発生数との関連性を検討した。また、崩壊発生時刻歴が明らかな災害について、崩壊発生時の雨量指標 R' (中井ほか, 2008)⁶⁾ を求め、谷密度との関係性を明らかにした。これらの結果から、流域別の斜面崩壊危険度評価に谷密度が有効な指標となり得ることを示すとともに、今後の展望として、土砂災害ハザードマップへの活用など、ソフト防災対策への活用を提案する。

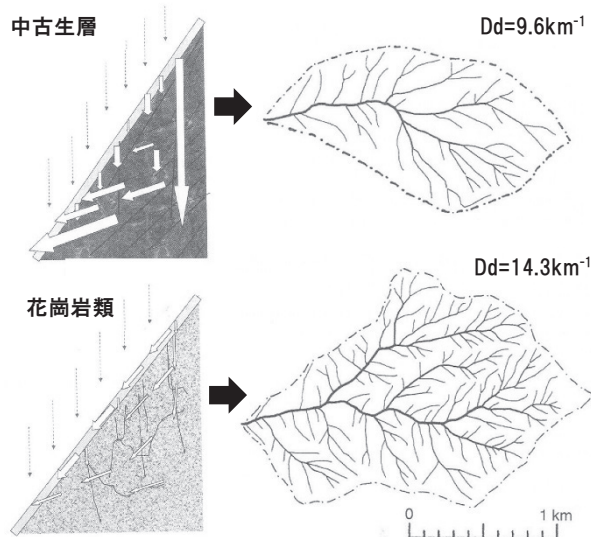


図-1 地質・水理地質構造等の違いによって現れる谷密度 (Dd) の差の概念図⁴⁾

2. 谷密度の算出

2.1 DEMを用いた谷地形の抽出

谷や水系網は線で表すことができるため、地形要素の中では比較的定量化し易いが、基図の縮尺によって谷地形の再現性は異なる。また、谷頭~0次谷斜面をどこまで取るかで個人差が生じる。木下ほか (2019)⁷⁾ は、DEMを用いた地形計測から谷地形を抽出する方法として、近隣セル間の集水方向を計算し、最急勾配方向を流水方向として表現する方法と、曲面上の任意の点を通る全ての

測地線の曲率の最大値と最小値の平均として定義される平均曲率に基づく方法を比較し、谷地形の抽出精度、再現性を検証した。その結果、平均曲率から抽出した谷地形の再現性が高いことが示された。本手法では、縦断形状が凸であれば縦断曲率は負の値となり、横断形状が凸であれば横断曲率は正の値となる。これら2つの曲率が両方とも凸ならば尾根地形を示し、Hは負となる。両方とも凹ならば谷地形を示し、Hは正となる。また、基図の縮尺と谷地形の再現性について、野々村ほか(2011)⁸⁾は、LPデータから作成した各メッシュサイズのDEM計測の結果を比較検討した。その中で、メッシュサイズが小さいほど地形を詳細に表現できるものの、メッシュサイズが小さくなるに従って地形面の平均曲率が0に近づき、地形再現性が低下に転じるとし、平均曲率から谷線を抽出するには、5m以上のDEMを使用することが望ましいとしている。これらのことから、本論では、10mDEMを用いた平均曲率の計測から谷線を抽出した(図-2、図-3)。谷線を構成するセルの大きさは10m四方で、セルが連続した矩形が谷線となる。これらの延長を計算する場合、それぞれの矩形の長辺や対角線の長さを考慮する必要がある。例えば、セルが直線方向に2つ連続した場合、延長は20mとなるが、2つが対角線方向に並んだ場合、対角線延長は $20m \times \sqrt{2}$ となる。直線方向、対角線方向様々な組み合わせで連続したセルは、どの部分を計測するかによって延長が変わってくる。ここでは、計算を簡素化させるため、1ピクセルが持つ延長を10mとみなし、ピクセルの総数 $\times 10m$ を谷線の延長とした。流域面積は、ピクセル1つの面積が $100m^2$ であるから、対象領域のセルの総数 $\times 100m^2$ として谷密度を求めた(図-4)。

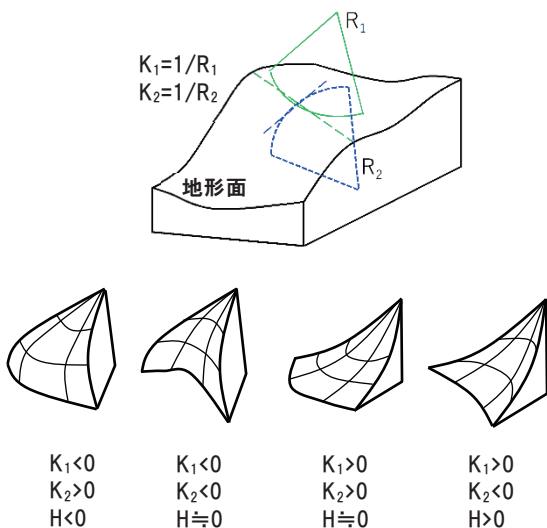


図-2 地形面の平均曲率 (H) に基づく地形表現の概念図

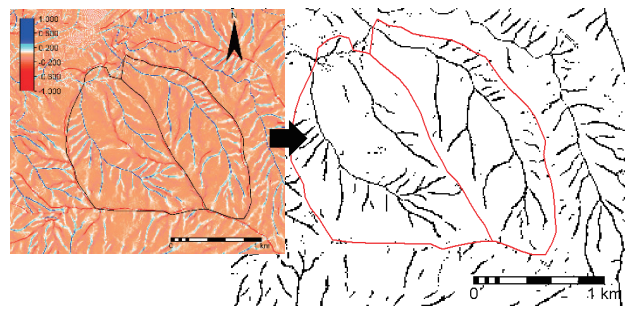


図-3 平均曲率から抽出した谷線の例

左図：暖色が尾根～斜面地形，寒色が谷地形
右図：抽出した谷線（赤枠は流域界）

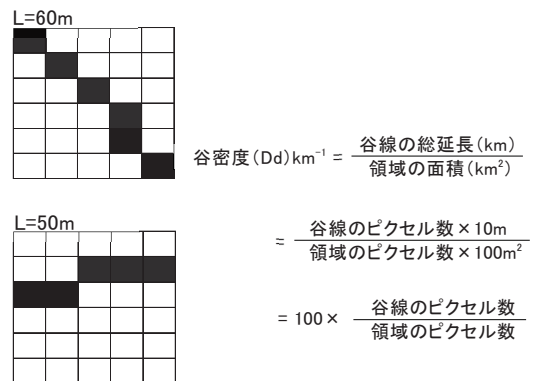


図-4 対象領域のピクセル数に基づく谷密度の計算

2.2 土砂災害発生流域を対象とした谷密度の算出

過去の土砂災害を対象として、斜面崩壊発生流域の谷密度を算出した。対象は①1999年広島豪雨災害、②2004年四国地方台風10号・15号・21号・23号災害(2004年四国地方台風災害：香川県東かがわ市、徳島県那賀郡那賀町、高知県土佐郡大川村など)、③2009年中国・九州北部豪雨災害、④2010年庄原豪雨災害、⑤2011年紀伊半島台風12号災害、⑥2014年広島豪雨災害の6事例とした(図-5)。これら災害で斜面崩壊が発生した流域について、谷密度を算出した。対象地域の地質は、深成岩類、変成岩類、堆積岩類と多岐にわたる。

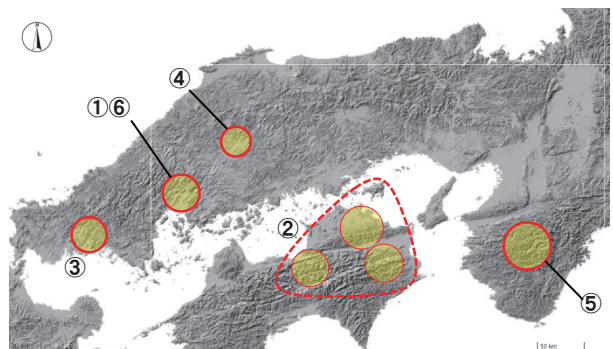


図-5 検討対象とした既往土砂災害の位置
(箇所番号①～⑥は本文参照)

ここで、②2004年四国地方台風災害を例に、土砂災害の概要と、谷密度の計測結果を示す。2004年は四国地方に相次いで台風が上陸あるいは接近し、各地で甚大な土砂災害を引き起こした。同年に四国地方に300km以内に接近した台風は10個で、10号、15号、21号、23号による被害が大きかった。このうち、台風10号は、7月29日から31日にかけて、東日本太平洋側から西日本で大雨となり、特に近畿地方南部や四国地方で非常に激しい雨が降った。8月1日から2日にかけては、発達した雨雲が太平洋から四国地方へと流れ込み、台風通過後も雨が長く降り続いたため、愛媛県や高知県では時間雨量100mmを超える猛烈な雨となった。7月29日から8月2日までの期間降水量は徳島県で1000mmを超え、高知県でも700mmを超えた。四国電力の観測では、徳島県上那賀町海川で日降水量1317mmに達し、これまでの日本の日降水量の記録を更新した。台風が時速10kmという非常に遅いスピードで進んだことも、雨量が多くなった原因の1つであった。徳島県那賀郡那賀町周辺では、那賀川沿いに斜面崩壊が多発し、同町大用知、加州、阿津江、小島、大用知地区などで被害が出た(図-6)。



図-6 2004年台風10号で発生した徳島県那賀郡那賀町(那賀川上流域)の斜面崩壊箇所

加州、阿津江、大用知地区における、斜面崩壊発生流域の谷密度の計測結果を、図-7に示す。

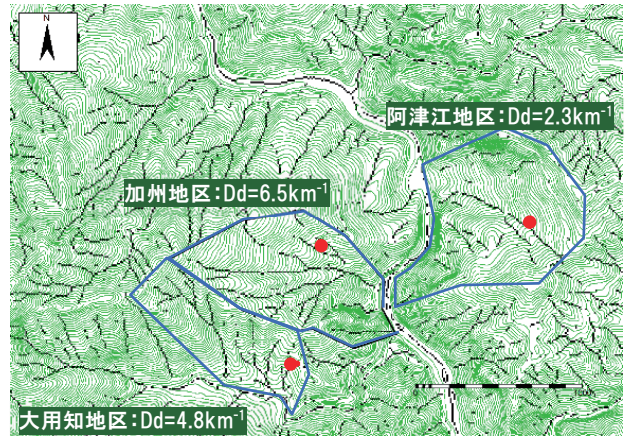


図-7 加州・阿津江・大用知周辺流域の谷密度(Dd)
 赤丸: 斜面崩壊箇所, 青枠: 崩壊斜面の流域
 黒線: DEM計測から抽出した谷線

3. 谷密度と崩壊密度の関係

3.1 斜面崩壊発生数

崩壊箇所の認定及び発生箇所のカウントは、発生直後に撮影された空中写真や、調査報告書等をもとに抽出した。斜面崩壊、土石流など崩壊形態によらず、いずれも発生源頭部を1箇所とし、土砂移動に伴う流送域や堆積域を含まないものとした(図-8)。

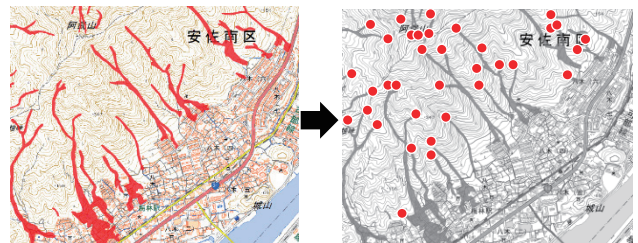


図-8 斜面崩壊発生箇所認定の例
 (赤丸を1箇所とする)

3.2 谷密度と崩壊密度の関係

谷密度(Dd)と崩壊密度(Fd)の関係を、図-9に示す。全体的に見て、谷密度が増加するにつれて、崩壊密度も増加する傾向が認められ、ある程度の相関が見て取れる。しかし、相関係数で示すと、 $r=0.38$ ($R^2=0.144$)であり、それほど高い値ではないことから、解析による影響が考えられ、対象とする流域面積との関係を検討した。ここで、流域面積に対して、10.0, 7.0, 5.0, 2.5, 2.0, 1.8, 1.5, 1.0, 0.5, 0.4, 0.3km²以下という閾値を設定し、それぞれの条件で再計算を行った。計算領域5.0km², 1.0km²の例を、図-10に示す。

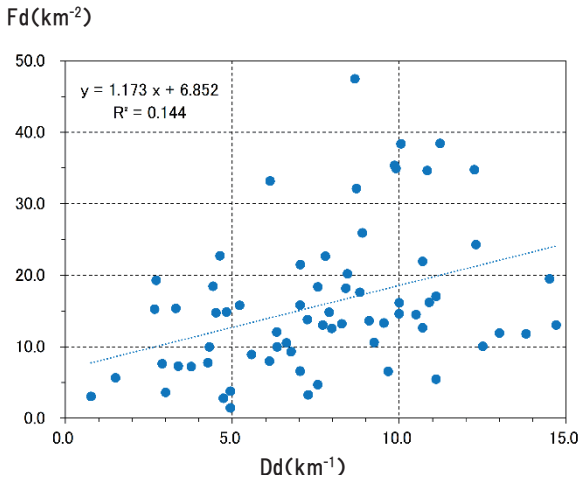


図-9 谷密度 (Dd) と崩壊密度 (Fd) の関係

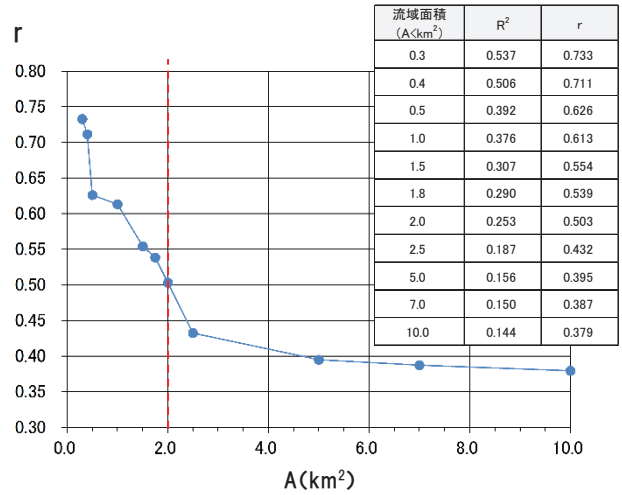


図-11 計算領域 (A) の違いによる谷密度-崩壊密度の相関係数 (r) の変化

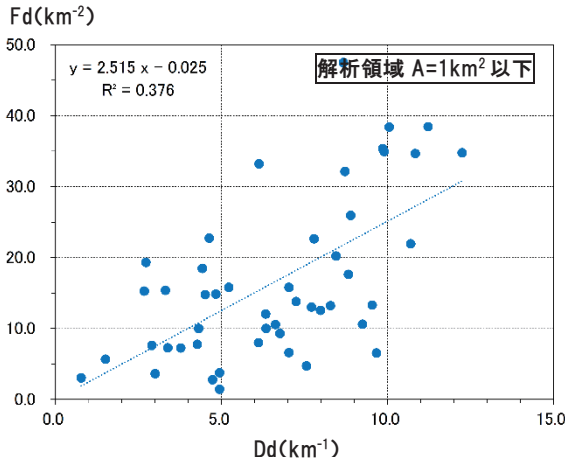
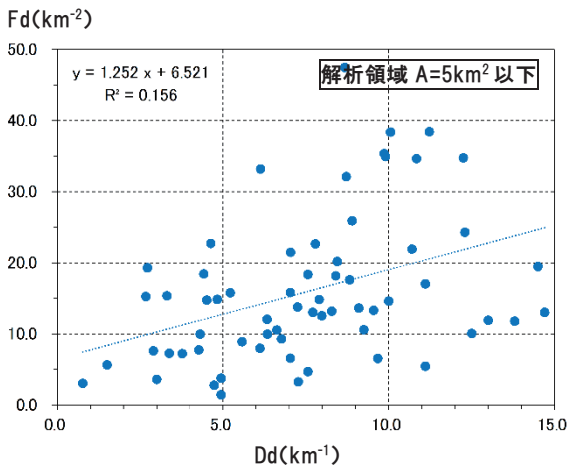


図-10 計算領域 5km² (上図) と 1km² (下図) における Dd—Fd 関係図

流域面積を変化させて求めた、谷密度 (Dd) -崩壊密度 (Fd) の相関係数 r を図-11 に示す。おおむね、流域面積が 2.0km² 以下になったあたりから、r が増加する傾向が認められる。これより、谷密度と崩壊密度との関係から斜面崩壊が発生する可能性のある流域 (場所) を検討する場合、流域面積 2.0km² 以下のエリアを対象に適用することが望ましいといえる。

4. 谷密度と雨量指標 R' の関連性

4.1 雨量指標 R' の特徴

本指標は、中井ほか (2008) ⁶⁾ で提案された、土砂災害警戒・避難のための新たな雨量指標で、従来の 2 つの雨量指標に左右される評価手法に対して、1 つの値でもって危険度を容易に判断しようとする目的で開発されたものである。x-y 座標上に長期実効雨量 (R_w) と短期実効雨量 (r_w) の 2 つの値を、中心を遠点においた楕円形の長径を用いて表現したものである (図-12、式 (1))。これをもとに、式 (2) を用いて初期値を 0 とし、土砂災害が発生する危険度が増すにつれて上昇する値に変換したものが R' である。

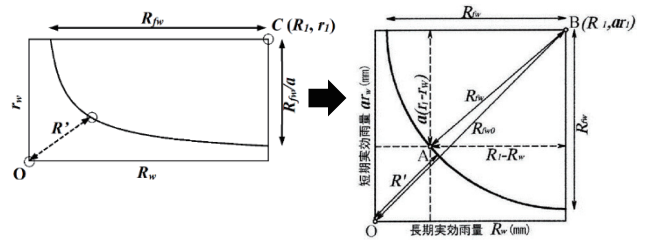


図-12 雨量指標 R' を表現する概念図 ⁶⁾

$$R_{fw} = \sqrt{(R_1 - R_w)^2 + a^2(r_1 - r_w)^2} \quad (1)$$

$$R' = R_{fw0} - R_{fw} \quad (2)$$

ここに、

R_w : 長期実効雨量 (mm)

r_w : 短期実効雨量 (mm)

R_1 : 座標上の横軸基準点

r_1 : 座標上の縦軸基準点

a : 重み係数

R_{fw0} : $R_w=0, r_w=0$ のときの R_{fw} 値

楕円形の中心の位置を示す (R_l , r_l) 及び重み係数 a を調整することにより、長期実効雨量 R_w と短期実効雨量 r_w の影響程度や、座標上での CL の傾きや曲率などを任意に設定することで、土砂災害発生リスクを R' という単一指標の大小により直感的に示すことができる。また、観測点の R' 値を用いてコンターマップを作成し、時間の経過とともに変化する土砂災害危険度の空間的な分布を視覚的に表現することができる (図-13)。

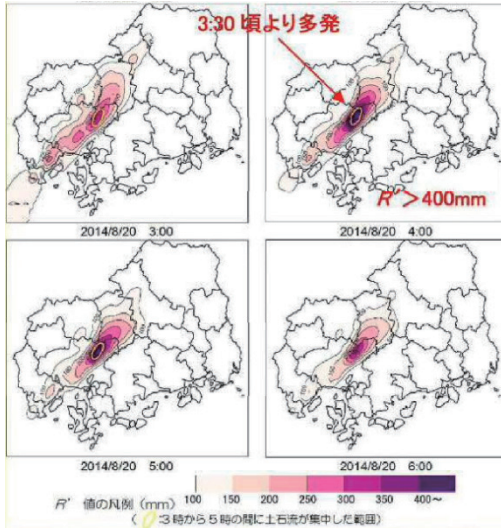


図-13 雨量指標 R' の経時変化図の例⁹⁾
(2014年広島豪雨災害時の R' の経時変化)

4.2 過去の土砂災害発生時の雨量指標 (R') の算出

検討対象とした既往の土砂災害について、斜面崩壊発生時の R' を算出した。計算条件として、実効降雨量の半減期は、長期実効降雨量 R_w を 72 時間、短期実効降雨量 r_w を 1.5 時間とした。 R_f の基準点 (R_l , r_l)、重み係数 a は、「これまで経験していない雨量に相当する値」を想定し、(R_l , r_l) をそれぞれ (1,500mm, 300 mm) とし、中心を遠方に設定した。重み係数は $a=3$ とし、雨量データは土砂災害発生箇所から最寄りの雨量観測点 (国土交通省、地方気象台、各自治体) の 10 分間雨量データを用いた。10 分間雨量データが無い観測点では、1 時間毎の雨量データを 10 分単位で比例配分して与えた。最寄りの観測点は、土砂災害発生箇所から概ね 5km 以内にあるものを選定した。対象とした土砂災害のうち、発生時刻歴が判明しており、雨量観測点から 2.5km 以内にあるものは、1999 年広島豪雨災害が 30 件、2004 年四国地方台風災害が 23 件、2009 年中国・九州北部豪雨災害が 4 件、2010 年庄原豪雨災害が 5 件 (8 地点)、2011 年紀伊半島台風 12 号災害が 17 件、2014 年広島豪雨災害が 7 件の計 86 件である (表-1)。ArcGIS を用いたデータ内挿より、検討流域周辺の雨量指標 R' 分布図を 500m メッシュで作成した (図-14)。この結果を ILWIS で 10m メッシュデータに変換して対象流域の地形図と重ねた。流域内の各メッシュの平均 R' 値を、斜面崩壊発生当時の流域内の R' とした。

表-1 既往土砂災害発生流域の谷密度及び斜面崩壊発生時雨量指標 R' の計算結果一覧

| 災害名 | No | 土砂災害発生場所 | 雨量観測点 | 雨量観測点からの距離 (km) | 谷密度 Dd (km ⁻¹) | 雨量指標 R' (mm) |
|--------------------------|----|-----------------|-----------|-----------------|----------------------------|----------------|
| 1999年 広島豪雨災害 | 1 | 廿日市市原 | 後畑 | 1.0 | 9.56 | 436.2 |
| | 2 | 廿日市市原 | 後畑 | 0.3 | 11.97 | 436.2 |
| | 3 | 広島市安佐北区安佐町 | 明神ダム | 1.7 | 9.27 | 417.5 |
| | 4 | 広島市佐伯区歴代3丁目 | 後畑 | 1.9 | 8.99 | 415.3 |
| | 5 | 広島市佐伯区五日市町 | 魚切ダム | 1.6 | 10.94 | 417.5 |
| | 6 | 広島市佐伯区五日市町 | 魚切ダム | 1.4 | 9.78 | 417.5 |
| | 7 | 広島市佐伯区五日市町 | 魚切ダム | 1.9 | 9.82 | 437.3 |
| | 8 | 広島市佐伯区五日市町 | 魚切ダム | 2.5 | 8.12 | 417.5 |
| | 9 | 広島市安佐南区沼田町 | 消防署 沼田出張所 | 2.2 | 10.82 | 370.1 |
| | 10 | 広島市安佐北区安佐町 | 道路公園 久地PA | 2.5 | 7.27 | 444.3 |
| | 11 | 広島市安佐北区安佐町 | 消防署 安佐出張所 | 1.0 | 8.25 | 359.7 |
| | 12 | 広島市安佐北区可部町 | 南原ダム | 2.3 | 11.15 | 302.4 |
| | 13 | 広島市安佐北区可部町 | 明神ダム | 1.9 | 12.07 | 417.5 |
| | 14 | 広島市安佐南区伴東 | 戸山 | 1.6 | 11.40 | 446.1 |
| | 15 | 広島市安佐南区上安町 | 消防署 上安出張所 | 1.9 | 10.04 | 350.5 |
| | 16 | 広島市安佐北区可部町 | 道路公園 明神 | 2.1 | 14.33 | 350.2 |
| | 17 | 広島市安佐北区可部町 | 道路公園 明神 | 1.8 | 12.05 | 350.2 |
| | 18 | 広島市佐伯区歴代3丁目 | 後畑 | 1.6 | 11.28 | 415.3 |
| | 19 | 広島市佐伯区五日市町 | 後畑 | 1.3 | 11.31 | 415.3 |
| | 20 | 広島市佐伯区五日市町 | 後畑 | 1.0 | 7.37 | 413.1 |
| | 21 | 廿日市市原 | 後畑 | 0.3 | 9.34 | 417.3 |
| | 22 | 廿日市市原 | 後畑 | 1.9 | 7.31 | 370.3 |
| | 23 | 広島市佐伯区五日市町 | 魚切ダム | 1.9 | 7.61 | 414.0 |
| | 24 | 広島市安佐南区沼田町 | 沼田 | 2.2 | 8.40 | 327.9 |
| | 25 | 広島市安佐北区安佐町 | 道路公園久地PA | 2.5 | 5.78 | 394.6 |
| | 26 | 広島市安佐北区安佐町 | 安佐 | 1.0 | 6.28 | 301.1 |
| | 27 | 広島市安佐北区安佐町 | 道路公園 明神 | 1.9 | 9.59 | 323.9 |
| | 28 | 広島市安佐北区安佐町 | 明神ダム | 2.1 | 10.99 | 282.8 |
| | 29 | 広島市佐伯区五日市町 | 後畑 | 1.6 | 8.76 | 353.1 |
| | 30 | 広島市佐伯区五日市町 | 後畑 | 1.3 | 8.83 | 353.1 |
| 2004年 四国地方 台風災害 | 1 | 高知県船戸地区 | 小松 | 2.0 | 1.58 | 790.1 |
| | 2 | 豊浜町野々池東大谷地 | 五郷 | 3.3 | 5.13 | 295.8 |
| | 3 | 大野原町五郷有木 | 五郷 | 0.7 | 6.71 | 323.9 |
| | 4 | 新居浜市西の土居町(後新居浜) | 土居 | 2.0 | 6.16 | 294.5 |
| | 5 | 豊浜町和田大平地区 | 五郷 | 4.0 | 6.14 | 266.3 |
| | 6 | 大野原町五郷井関谷下 | 五郷 | 1.6 | 6.65 | 376.3 |
| | 7 | 高松市新田町(北の沢)古高松 | 古高松 | 2.8 | 9.33 | 332.9 |
| | 8 | 大野原町萩原高尾地区 | 五郷 | 2.5 | 5.93 | 260.4 |
| | 9 | 坂出市瀬居町 | 王越 | 3.8 | 4.32 | 300.4 |
| | 10 | 東かがわ市日下 | 日下峠 | 0.9 | 8.84 | 608.0 |
| | 11 | 香川県大川町森行 | 日下峠 | 2.0 | 8.97 | 274.6 |
| | 12 | さぬき市門入 | 門入 | 3.1 | 10.23 | 543.3 |
| | 13 | 土庄町見目 | 殿川 | 2.8 | 4.16 | 376.2 |
| | 14 | 香川県城山 | 炭所 | 3.8 | 5.24 | 310.8 |
| | 15 | 香川県壺山 | 炭所 | 0.8 | 7.46 | 310.8 |
| | 16 | 高知県船戸地区 | 小松 | 2.0 | 1.56 | 725.3 |
| | 17 | 大野原町五郷有木 | 五郷 | 0.7 | 6.30 | 322.7 |
| | 18 | 豊浜町和田大平地区 | 五郷 | 4.0 | 5.80 | 294.5 |
| | 19 | 大野原町五郷井関谷下 | 五郷 | 1.6 | 6.23 | 321.6 |
| | 20 | 高松市新田町(北の沢)古高松 | 古高松 | 2.8 | 8.53 | 309.4 |
| | 21 | 大野原町萩原高尾地区 | 五郷 | 2.6 | 5.60 | 333.1 |
| | 22 | 坂出市瀬居町 | 王越 | 3.8 | 4.14 | 294.7 |
| | 23 | 東かがわ市日下 | 日下峠 | 0.9 | 8.12 | 655.7 |
| 2009年 防府豪雨災害 | 1 | 防府市奈美 | 大平山 | 2.3 | 9.57 | 372.5 |
| | 2 | 防府市真尾 | 真尾 | 1.8 | 8.50 | 377.7 |
| | 3 | 防府市大字高海宇藤兵 | 大平山 | 2.3 | 7.28 | 376.2 |
| | 4 | 防府市大字真尾宇小池 | 真尾 | 1.8 | 6.57 | 391.7 |
| 2010年 庄原豪雨災害 | 1 | 庄原市川北町重行 | 川北 | 1.1 | 9.23 | 286.0 |
| | 2 | 庄原市川北町重行 | 川北 | 1.6 | 9.56 | 286.0 |
| | 3 | 庄原市川北町重行 | 川北 | 0.6 | 9.17 | 286.0 |
| | 4 | 庄原市川北町重行 | 川北 | 1.4 | 9.68 | 294.6 |
| | 5 | 庄原市川北町重行 | 大戸 | 1.5 | 10.84 | 371.7 |
| 2011年 紀伊半島 台風12号災害 | 1 | 奈良県吉野郡野迫川村 | 北股 | 1.6 | 6.92 | 557.2 |
| | 2 | 奈良県五條大塔町宇井 | 宇井 | 0.7 | 2.82 | 489.0 |
| | 3 | 奈良県吉野郡天川村塚 | 九尾 | 0.6 | 5.96 | 531.8 |
| | 4 | 奈良県吉野郡天川村塚 | 九尾 | 1.3 | 2.86 | 604.0 |
| | 5 | 奈良県吉野郡天川村塚 | 九尾 | 1.0 | 2.75 | 585.9 |
| | 6 | 奈良県吉野郡川上村迫 | 迫 | 0.8 | 4.66 | 385.1 |
| | 7 | 奈良県吉野郡十津川村 | 嵐屋 | 2.0 | 5.43 | 627.6 |
| | 8 | 奈良県五條大塔町辻堂 | 猿谷 | 2.2 | 4.45 | 515.3 |
| | 9 | 和歌山県田辺市熊野 | 熊野 | 1.6 | 4.30 | 607.7 |
| | 10 | 和歌山県田辺市伏見野 | 串崎 | 2.0 | 7.65 | 670.5 |
| | 11 | 奈良県吉野郡野迫川村 | 北股 | 1.6 | 6.92 | 551.9 |
| | 12 | 奈良県五條大塔町宇井 | 宇井 | 0.7 | 2.82 | 489.0 |
| | 13 | 奈良県吉野郡川上村迫 | 迫 | 0.8 | 4.66 | 417.5 |
| | 14 | 奈良県吉野郡十津川村 | 嵐屋 | 2.0 | 5.43 | 740.3 |
| | 15 | 奈良県五條市大塔町辻堂 | 猿谷 | 2.2 | 4.45 | 535.1 |
| | 16 | 和歌山県田辺市熊野 | 熊野 | 1.6 | 4.30 | 811.8 |
| | 17 | 和歌山県田辺市伏見野 | 串崎 | 2.0 | 7.65 | 685.1 |
| 2014年 広島豪雨災害 | 1 | 安佐北区可部町桐原21 | 三入東 | 0.8 | 7.84 | 323.4 |
| | 2 | 安佐北区可部東6丁目1 | 安佐北区役所 | 1.4 | 4.99 | 478.0 |
| | 3 | 安佐北区可部東6丁目3 | 上原 | 1.3 | 6.31 | 491.5 |
| | 4 | 安佐南区八木4丁目51 | 上原 | 3.0 | 4.44 | 344.2 |
| | 5 | 安佐南区八木3丁目阿部 | 上原 | 3.3 | 4.44 | 448.2 |
| | 6 | 安佐南区八木3丁目黒上 | 上原 | 3.7 | 5.86 | 409.1 |
| | 7 | 安佐南区緑井8丁目 | 上原 | 4.0 | 9.38 | 448.2 |

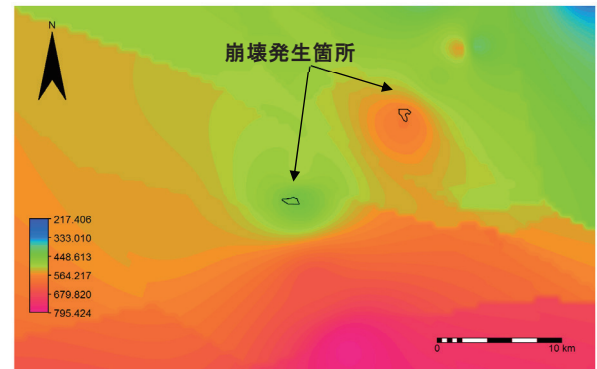


図-14 雨量指標 R' の分布図の例 (10m メッシュ)

4.3 谷密度と雨量指標 R' との関連性

谷密度と雨量指標 R' の関係図を、図-15 に示す。全体的に、谷密度が増加するに伴い、雨量指標 R' は減少する傾向が認められる。多くは R' が 250~450mm の範囲に集中する。谷密度が 6km^{-1} 程度以上になると、 $R'=250\text{mm}$ 付近が下限となる。 R' の上限値は約 800mm で、谷密度の増加に伴い減少する。谷密度が小さい流域は斜面の表土層や風化帯層厚が厚く、貯水能力が高いため、崩壊までの R' が大きいと考えられる。逆に、谷密度が大きい流域は貯水能力が相対的に低いため、低 R' (少ない降雨) で表土層が飽和し、斜面崩壊に至ると考えられる。また、斜面崩壊は谷密度の大小によらず、 $R'=250\text{mm}$ を越えたあたりから発生するといえる。

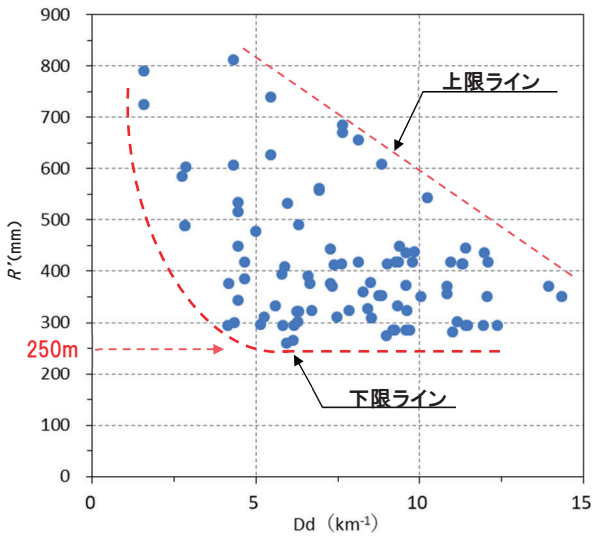


図-15 谷密度 (Dd) と雨量指標 (R') の関係

ここで、谷密度と雨量指標 R' の関係において、地質の違いによる差異について検証する。構成地質を、火成岩類 (花崗岩類, 流紋岩類など) と堆積岩類 (中古生層や付加体堆積岩, 和泉層群, 堆積岩起源の変成岩類など) に大別した概念図を、図-16 に示す。本図では、火成岩類, 堆積岩類 2つの領域に分けている。火成岩類で発生した崩壊は、谷密度が大きく雨量指標 R' が小さい領域に分布する。対して、堆積岩類で発生したものは、谷密度は小さく雨量指標 R' が大きい領域に分布する。この違いは、両地質の耐風化性に起因する斜面の風化帯層厚の差によるものとみられる。これは、Onda (1993) ⁴⁾ や長谷川ほか (2008) ⁵⁾ などの指摘と整合的である。両地質とも谷密度の違いはあるものの、谷密度が大きくなるにつれて雨量指数 R' が小さくなる傾向が認められる。これは、谷密度と雨量指数 R' の関係性においては、地質の違いによる顕著な差は無いということを示している。このほか、花崗岩類の中で、雨量指数 R' が大きいものが3件ある (図中赤点線枠内) が、これらはいずれも「領家花崗岩」地域で発生した斜面崩壊で、花崗岩類事例の多くを占める「広島型花崗岩」とは形成時期や鉱物組成を異にする。このような初生的な岩質の違いや、岩体内の節理や亀裂

の発達程度の差が、同じ花崗岩類でも風化帯の厚さや、岩盤の水理地質構造、耐崩壊性などの違いとなって現れると考えられる。

以上の結果から、谷密度は、斜面崩壊の主誘因である雨量指標 R' との関係性が高いことが明らかになった。流域の谷密度と時々刻々変化する R' との関係をモニタリングすることで、土砂災害発生「時間」の予測につながると考えられる。

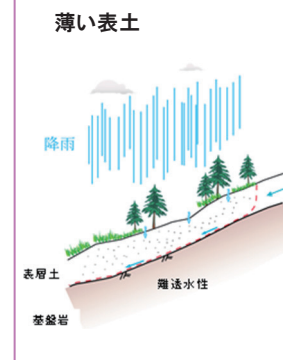
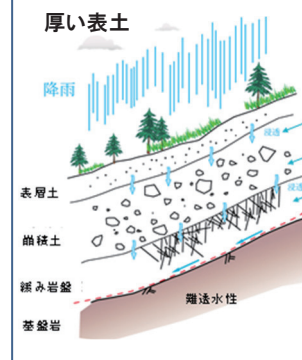
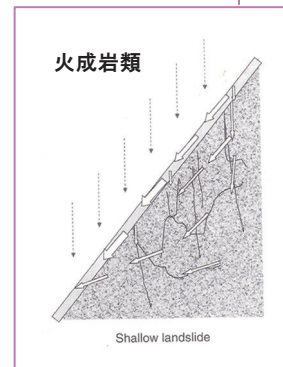
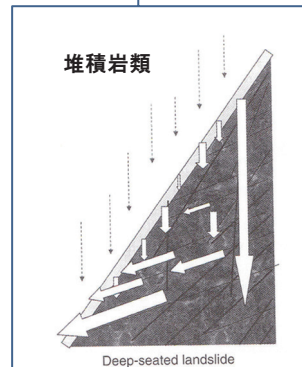
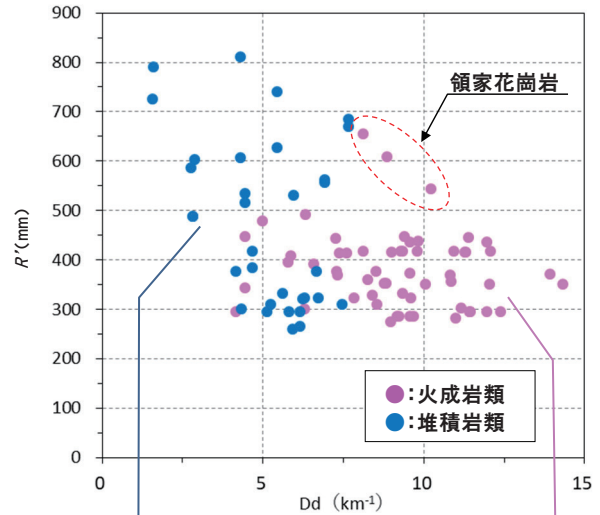


図-16 谷密度 (Dd) と雨量指標 R' の関係性を示す斜面水理地質特性の概念図

4.4 本手法の適用条件の検討

(1) 地すべり地域への適用

地すべりは、地下深部まで破碎質であることが多く、地表付近まで飽和することが少ないため、周辺斜面と比べて地表に谷が形成される速度は遅い。また、地表が活動的であるため、地下水の流動経路の変化や浸食地形のリセットが起こりやすいため、谷密度を小さく見積ってしまう(図-17)。周辺流域と比べて著しく谷密度が低い場合は、地すべり活動の影響の有無を検討する必要がある。

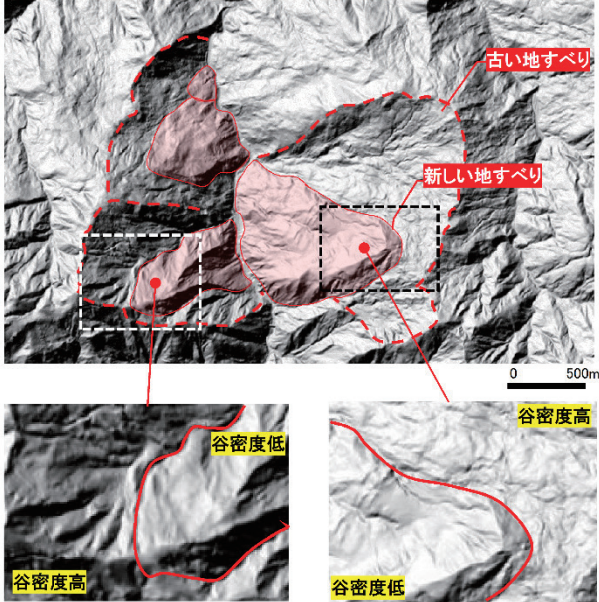


図-17 地すべりブロックの谷密度の例
新しい地すべり(活動的な地すべり)ほど谷密度が低い

(2) キャップロック構造地域への適用

キャップロック構造は浸食抵抗力が低い地質の上に抵抗力が高い岩石が載るもので、メサ(テーブル状台地)やビュート(孤立丘)といった特徴的な地形をなす。屋島はその代表的な地形の1つで、風化が進行した浸食抵抗力の弱い花崗岩の上を、硬質で浸食抵抗力の高い安山岩が広く覆っている(図-18)。安山岩は硬質であるが、ガラス質で冷却節理が多く発達し、全体に多亀裂である。そのため、山頂からの岩盤崩壊や落石などの供給が活発である。これらの岩砕物が「谷埋め堆積物」として谷を埋積し、谷地形がリセットされ、谷密度が低くなることもある。花崗岩地域を対象に、キャップロック構造の有無で、谷密度と崩壊密度を比較した結果を図-19に示す。キャップロック構造の有無によらず、谷密度と崩壊密度は比較的良好な相関を示す。しかし、キャップロック構造を持たない花崗岩地域に比べ、キャップロック構造を持つ地域の方が、谷密度、崩壊密度ともに小さくなる傾向が認められる。このため、キャップロック構造の地域においては、谷埋め堆積物の有無や、その程度を確認する必要がある。また、第四紀火山岩地域も谷地形の埋積により、他地域と比べ谷密度が小さくなる(図-20)。

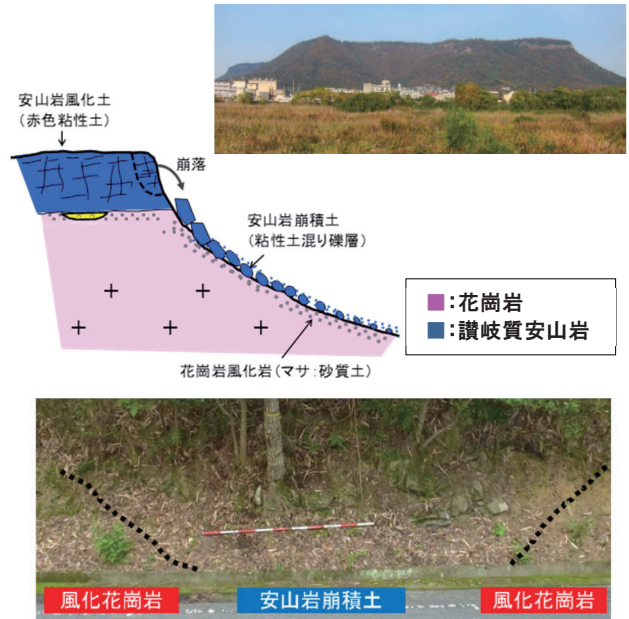


図-18 キャップロック構造及び谷埋め堆積物の例(屋島)

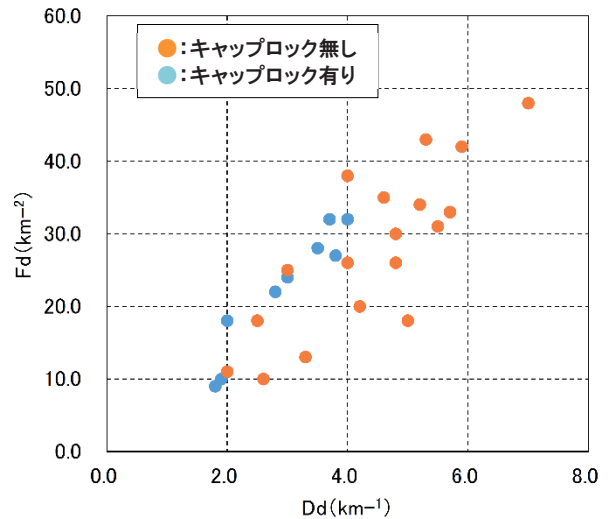
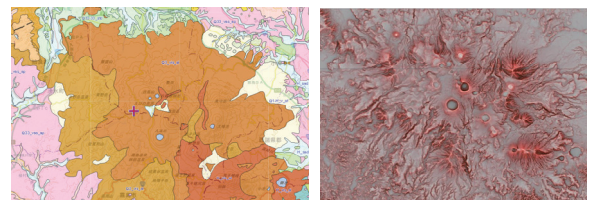


図-19 キャップロック構造の有無による谷密度(Dd)-崩壊密度(Fd)の関係図



(デイサイト・流紋岩類 玄武岩質安山岩溶岩)

図-20 第四紀火山地域の地質(左)と赤色立体地図(右)

5. 土砂災害警戒・避難に向けた本手法活用の提案

謝辞

本論は、香川大学創造工学部安全システム建設工学科の修士論文、卒業論文において収集整理されたデータを使用し、発展させたものであり、同学科卒業生諸氏のご尽力に感謝の意を表します。

5.1 流域別土砂災害危険度予測への活用

谷密度と崩壊密度，雨量指標 R' との間の関連性から，土砂災害発生危険度が高い流域の予測手法を提案する。雨量指標 R' の下限線を「土砂災害発生基準線」とみなすと，谷密度 $Dd \leq 6 \text{ km}^{-1}$ の流域において，同基準線は $R' = 1174 \times Dd^{0.85} \text{ (mm)}$ ， $Dd > 6 \text{ km}^{-1}$ の流域で $R' = 250 \text{ mm}$ で表すことができる（図-21）。また， R' の分布において，より小さい R' で斜面崩壊が発生する領域を危険度が高いとする区分も有効である。

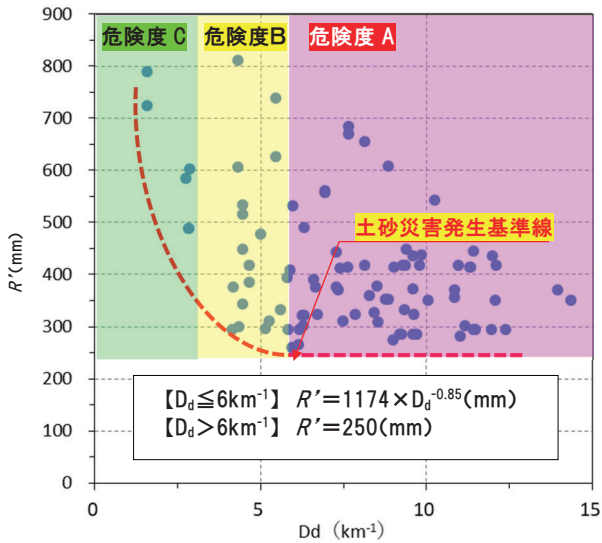


図-21 雨量指標 R' 分布による土砂災害危険度評価の例

5.2 土砂災害ハザードマップへの活用

土砂災害ハザードマップは危険箇所の周知，避難経路の明示など，ソフト対策の重要な情報である。ただし，これらのデータは，土砂災害発生危険度や発生頻度の高低を評価するものではない。そこで，各溪流に対して谷密度-雨量指標 R' を指標とした評価を加えることで，流域別に土砂災害発生危険度を示すことができる（図-22）。

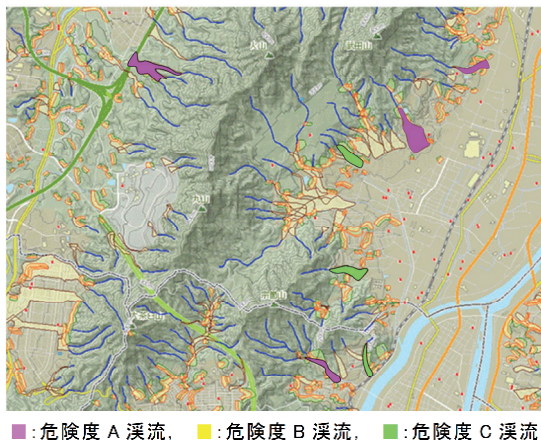


図-22 谷密度 (Dd) - 雨量指標 R' を考慮した流域別土砂災害危険度マップの例

参考文献

- 1) 阪口豊：流域の発達と日本島の流域特性，地理学評論，Vol.38, No.2, pp.74-91, 1965.
- 2) 守屋以智雄：崩壊地形を最小単位とした山地斜面の地形分類と斜面発達，日本地理学会予稿集 2, pp.168-169, 1972.
- 3) 吉川虎雄，杉村新，貝塚爽平，太田陽子，阪口豊共著：新編日本地形論．東京大学出版会，1973, 415p.
- 4) Onda, Y. : Hillslope hydrology and mass movements in the Japanese Alps, MOUNTAIN GEOMORPHOLOGY, pp.153-164, 1993.
- 5) 長谷川修一，三村亨，Ranjan Kumar Dahal, 山中稔，野々村敦子：斜面崩壊規模の指標としての谷密度の可能性，地盤災害・地盤環境問題論文集，Vol.8, pp.11-18, 2008.
- 6) 中井真司，海堀正博，佐々木康，森脇武夫：雨量指標 R' による土砂災害発生基準の設定と監視雨量強度 R_R の提案—地域ごとの降雨履歴特性を反映した適用の可能性—，砂防学会誌，Vol.60, No.6, pp.4-10, 2008.
- 7) 木下博久，長谷川修一，野々村敦子，山中稔：谷密度を指標とした流域スケールにおける斜面崩壊危険度評価手法の検討，応用地質，Vol.56, No.6, pp.472-484, 2019.
- 8) 野々村敦子，鎌田昇悟，長谷川修一，林宏年：DEMを用いた内水危険箇所抽出方法の検討，土木学会論文集，Vol.67, No.2, pp.131-136, 2011.

(2021年11月15日 受付)