

5. 崩壊防止機能区分図の評価

5.1 森林の崩壊機能区分図の作成

【仕様書項目 (1) ②】

上記①で調査したデータを基に、森林の「崩壊防止機能区分図」を判定するための評価点算出方法を確定させる。

令和元年度業務において、森林の「崩壊防止機能区分図」について、根系による断面抵抗力 ΔC を用いた区分図と、土塊内に存在する根量 Wr を用いた区分図の 2 種類が作成された。ここでは、両者の考え方を簡単に説明し、「崩壊防止機能区分図」としてどの指標を用いるのが適切か、考えを述べる。

5.1.1 林野庁資料「流木災害対策の必要な森林を抽出する手法 手引書（案）」について

林野庁が平成 27 年度に作成した手引書で「平成 27 年度流域山地災害等対策調査（流木災害対策手法検討調査）委託事業」（以下、手引 2016 という。）の成果品である。

手引 2016 は流木に対応したものだが、この中で樹木根系が発揮する断面抵抗力 ΔC を指標として GIS ベースで森林の土砂崩壊防止機能を a~d の 4 段階で評価するものである。

区分設定に必要となる情報は『樹種』『立木密度』『胸高直径』の 3 つである。情報の取得方法は現地調査でもよいが、20m メッシュ単位で対象範囲全域に必要となることから、航空レーザ測量等の広範囲情報をベースに作業するのが基本となる。樹種、立木密度、胸高直径をそれぞれ評価点 P1、P2、P3 に換算し、それらを掛け合わせて総合評価点 P が算出され、森林の土砂崩壊防止機能区分（図 5.1）が決定する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{樹種：} \quad \text{評価点 P1} \\ \text{立木密度：} \quad \text{評価点 P2} \\ \text{胸高直径：} \quad \text{評価点 P3} \end{array} \right\} \rightarrow \text{総合評価点 } P = P1 \times P2 \times P3$$

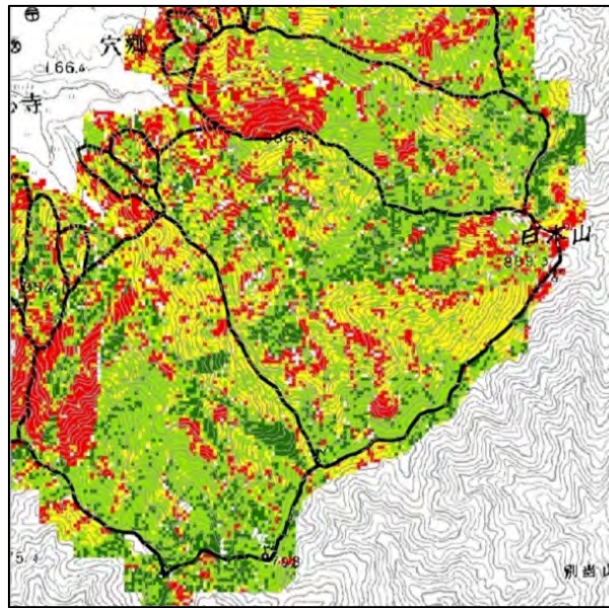


図 5.1 森林の土砂崩壊防止機能区分図（林野庁の手引 2016）

5.1.2 断面抵抗 ΔC による崩壊防止機能評価

手引 2016 において、森林が発揮する崩壊防止機能は断面抵抗 ΔC で評価される。水平根が発揮する断面抵抗を ΔC と呼び、北原¹により簡易な推定式が提案され実務利用に供されている。

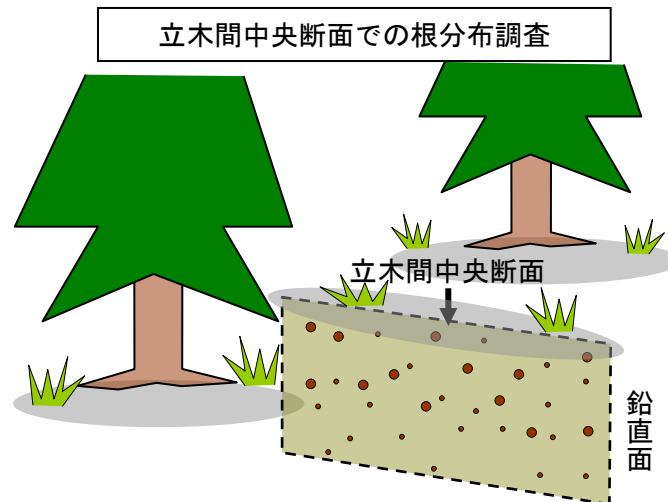


図 5.2 立木間中央断面での根の分布調査

北原は立木間の中央断面がもっとも根密度が低く、この断面での根本数と根直径を調べ、1 本 1 本の根の引抜き抵抗 T を算定し、断面に存在する根の数だけ T を足し合わせた値を $\Delta C = \sum T_i$ として、森林による崩壊防止機能の指標としている。

ΔC は単位断面積あたり（例えば kN/m^2 ）の根系による崩壊防止力であり、断面掘削調査により得られる。これをさまざまな林分で調査し、北原は図 5.3 の結果を得ている。

北原がとりまとめた、 ΔC [kN/m^2]を胸高断面積合計 ΣA [m^2/ha]から推定する簡易式を示す。

$$\Delta C = \alpha'(\Sigma A)^{1.4}$$

ただし、樹種別係数 α' ：ヒノキ0.0322，スギ0.0384，広葉樹0.0193

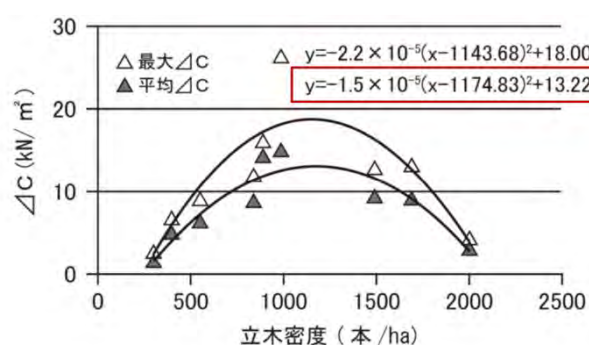


図 5.3 カラマツ林の平均、最大 ΔC 立木密度の関係（伴・北原ら 2011）

¹ 北原曜（2010）：森林根系の崩壊防止機能，水利科学，53 巻 6 号 p.11-37

ΔC マップ（断面抵抗力）の作成方法

1. 利用情報：樹種、立木密度、胸高直径
2. 樹種評価点 P1、立木密度評価点 P2、胸高直径評価点 P3 を算定する（表 5.1）。
各評価点の重みは、北原のΔC研究成果に基づき設定されている。
3. 以下の方法 a で総合評価点 P を、もしくは方法 b でΔCの値を直接算定する。
方法 a：表 5.1 から評価点 P1、P2、P3 を決定し、総合評価点 $P = P1 \times P2 \times P3$ の値より、
 森林の土砂崩壊防止機能区分 a~d をグリッドごとに適用する。
方法 b：簡易式 $\Delta C = \alpha'(\Sigma A)^{1.4}$ により、ΔC を直接算定する。
4. ΔC マップとして、崩壊防止機能の塗分け図を作成する。

表 5.1 評価点 P1、P2、P3 の配点（林野庁手引 2016 より）

樹種 (P1)		立木密度 (P2)			胸高直径 (P3)	
区分	点数	本数 (本/ha)	点数		胸高直径 (cm)	点数
			針葉樹人工林	針葉樹人工林以外		
A (参考樹種:スギ、 針・広天然生林)	1.6	400~600	0.5	0.5	10~15	0.2
		600~800	0.8	0.8	15~20	0.5
B (参考樹種:ヒノキ、 広葉樹二次林)	1.2	800~1,600	1.0	1.0	20~25	1.0
		1,600~1,800	0.7	1.0	25~30	1.9
C (参考樹種:マツ類)	0.8	1,800~2,000	0.4	1.0	30~35	3.0
					35~40	4.4

5.1.3 根重量 Wr による崩壊防止機能評価

北原によるΔCとは別のアプローチによる研究として阿部²の根重量 Wr がある。阿部は断面で定義される根系の抵抗力でなく根系のボリューム(体積/重量)に基づく評価方法をあらたに提案した。

阿部の考え方は、表層崩壊の発生機構をこれまで想定していた一定の厚みがあるせん断面での変位進行でなく、土塊全体が徐々にたわんで歪み亀裂が増えて崩れる、という発生機構を想定すべきというもので、考え方を図 5.4 に端的にあらわす。阿部の概念は、面でのすべりでなく土塊全体のたわみを考える、という点で北原のΔCと異なる。結果として、断面でなく根量(体積/重量)を評価するという発想が目新しい。

² 阿部和時（2019）：豪雨災害でみられる森林の持つ表層崩壊防止機能とそのメカニズムに関する研究動向，補強土植生のり枠工「GT フレーム工法」技術講習会（東京地区）－特別講演－，配布資料

阿部の考え方は森林の崩壊防止機能として、根の体積（ボリューム）を指標にするという点で、断面評価である ΔC とは異なる視点からの指標となる。

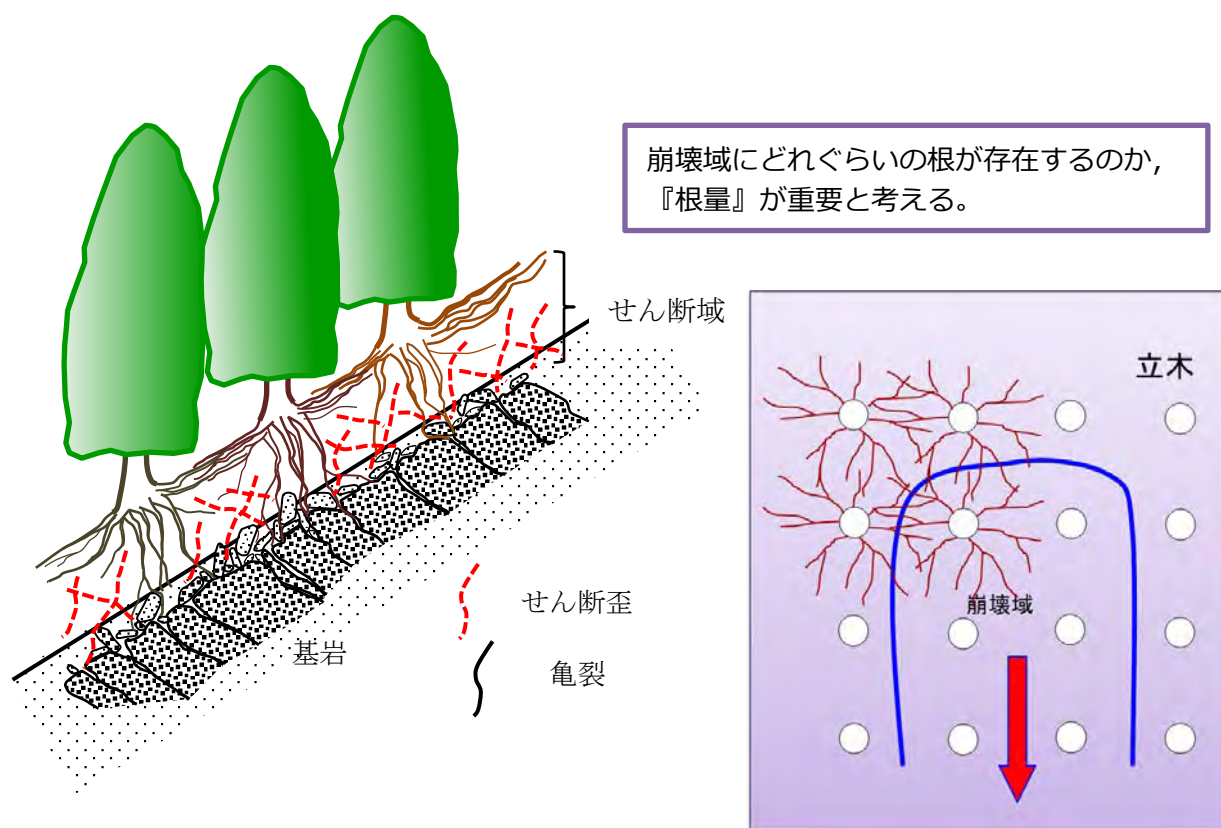


図 5.4 根系が表層土のせん断歪を抑制して崩壊防止機能を発揮するイメージ
(阿部、2019)

Wr マップ（根重量）の作成過程

1. 利用情報：樹種、立木密度、胸高直径
2. 胸高直径を基に荻住の単木の根量（現存量）式を用いて、単木の根重量（乾重 kg）を算定する。針葉樹（スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ等）は樹種別、広葉樹は広葉樹平均の式。
3. 根重量[kg/本]に立木密度を乗じて、単位面積あたり根重量 Wr [kg/m²]をグリッドごとに算定する。
4. Wr マップとして、崩壊防止機能の塗分け図を作成する。

5.1.4 断面抵抗 ΔC 根重量 Wr の考え方の違い

■共通点

- 林分の樹種、立木密度、胸高直径の情報を利用する。
- 樹種別ではスギがもっとも強く、次いでヒノキ、アカマツはもっとも弱い。
- 胸高直径が大きくなると崩壊防止機能が高まる。その度合は線形比例よりも強くべき乗式で影響。

■相違点

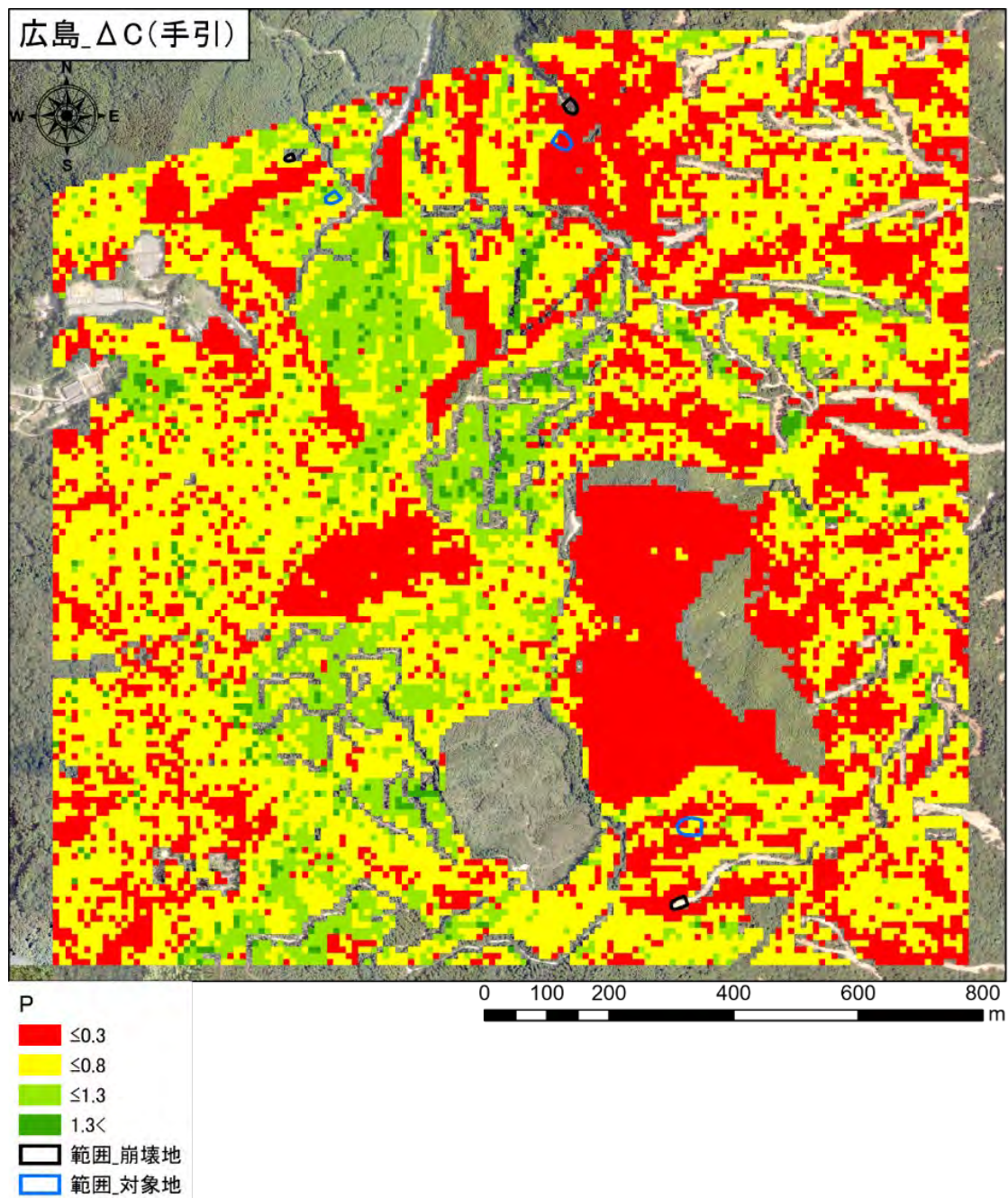
- 考え方の根本（拠り所とする概念）が異なる。
 - ・ ΔC マップは断面で評価される根系抵抗に基づく。
 - ・ Wr マップは領域内に存在する根量に基づく。
- 根拠文献が異なる。
 - ・ ΔC マップはおもに北原が調査した研究成果に基づく。
 - ・ Wr マップはその基本概念を阿部が提唱したが、これに続く研究成果はまだない。今回の検討では根量の算定に苅住のデータ（べき乗式）を利用。
- 立木密度の影響が異なる。
 - ・ ΔC マップは 800～1,600 本/ha がもっとも強く、それより密でも疎でも弱くなる（表 5.1）。
 - ・ Wr マップは本数が多いほど Wr は増える。一方で、本数密度が高いほど胸高直径は細く根重量[kg/本]が小さくなるため、単純に本数密度が高いほど崩壊防止機能が高いかどうかは要検討。
- 樹種の影響が異なる。
 - ・ ΔC マップはもっとも強い A 種が 1.6、もっとも弱い C 種が 0.8 で、A は C の 2 倍強い（表 5.1）。
 - ・ Wr マップをスギとアカマツで比較すると胸高直径依存で 0.9～1.4 倍差となる。

■今年度検討にあたっての方針

崩壊防止機能をあらわす指標として用いられる ΔC と、あらたな指標である根重量 Wr は、両者のよって立つ考え方が異なる。 ΔC は根系による断面抵抗であり、崩壊に対する物理的な抑止力として期待できるが、 Wr は土中内に存在する根量そのものであり、根量の大小が崩壊に対する物理的な抑止力とみなせるかについて物理的根拠はまだない。 Wr は理論的なバックグラウンドがまだないのが実情である。

一方で、 ΔC が抱える課題として「根が発揮する最大値を合計している点」も看過できない。北原の研究成果の後、2010 年以降の研究で新たに RBM（Root Bundle Model）モデルが登場し、最大値を単純に積算することは明らかな矛盾として認識されるようになった。 ΔC は過大な抵抗を算定しているという点を、技術的に正しく認識し、それに対する修正対処が必要である。

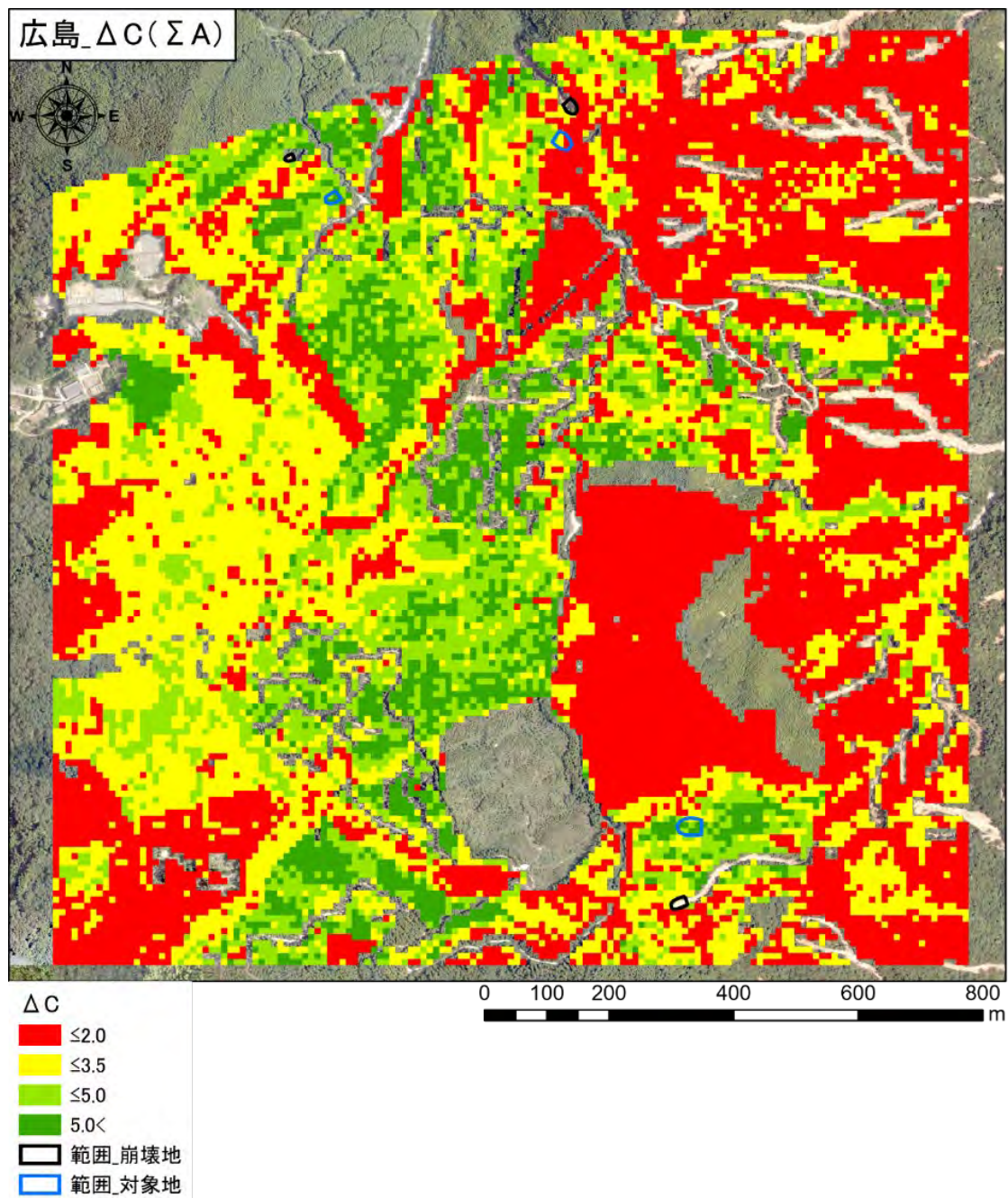
図 5.5～図 5.7 をみると、同じ情報から算定される ΔC マップと Wr マップは比較的似た分布性状を示す。以上の観点を踏まえつつ、本年度はより崩壊防止機能区分図に適した指標を見出す検討を進めた。



数値単位：手引に基づく評価点 P [無次元]

無地部分は森林外または低樹高のため LP 解析が困難な範囲

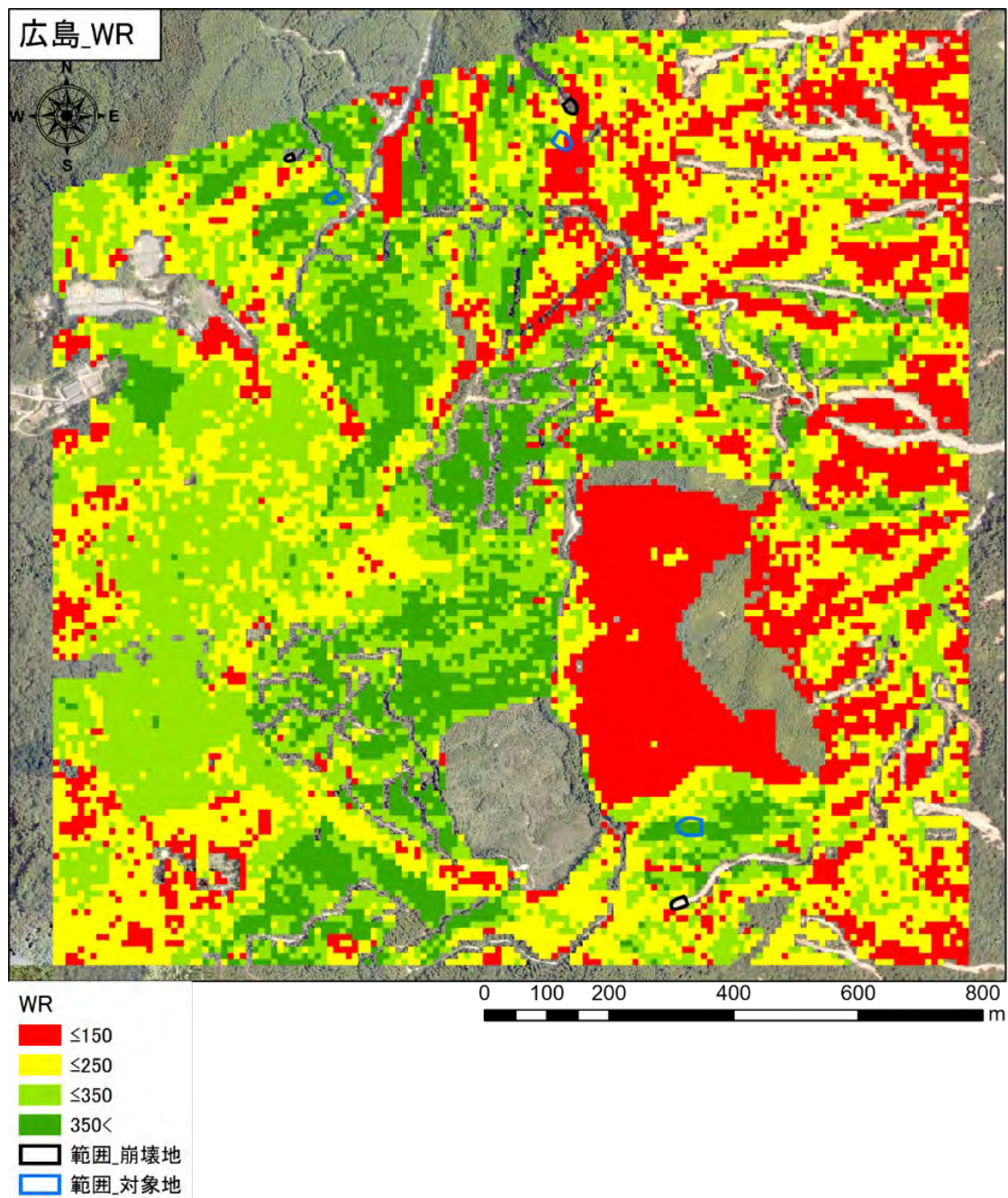
図 5.5 崩壊防止機能区分図の例（ΔCマップ、手引き 2016・方法 a による）



数値単位：根系による断面抵抗力 ΔC [kN/m²]

無地部分は森林外または低樹高のため LP 解析が困難な範囲

図 5.6 崩壊防止機能区分図の例 (ΔCマップ、方法 b による)



数値単位：地下部重量 Wr [kg/10m グリッド]

無地部分は森林外または低樹高のため LP 解析が困難な範囲

図 5.7 崩壊防止機能区分図の例 (Wr マップ)

5.2 手引の評価点 P 、 ΔC 、 Wr の違いと使い分け

現在、森林が発揮する表層崩壊防止機能として、手引による評価点 P 、 ΔC と Wr の3種類の指標が存在する。これら3種類の指標の質的な違いと、それぞれをどう活用するかについて本業務において検討した。

5.2.1 ΔC と Wr ：それぞれの定義

ΔC と Wr はその定義が異なる。

- ・ ΔC は地中の鉛直断面で評価される根系抵抗力である。単位例： kN/m^2
- ・ Wr は土塊領域内に存在する根量である。単位例： kg/10m グリッド

以下に両者の定義を説明する。

(1) 断面抵抗 ΔC

ΔC は単位断面積あたり（例えば kN/m^2 ）の根系が発揮する崩壊防止力で、断面掘削調査により得られる。

(2) 根量 Wr

掛谷・阿部は根系が発揮する崩壊防止機能は、表層土中の根量 Wr に依存すると考えている。

- ①崩壊地底面・側面に形成されるすべり面（移動土層と不動土層の境界）で根の効果が発揮される、という従来の考え方が適切でない。
- ②すなわち、崩れ落ちる表層土は地表面より下層に向かって徐々に孔隙が減少し、土質強度も地表面より下層に向かって徐々に強くなり、基岩層や基盤層に到達する。このため、表層土内に薄く平滑なすべり面が形成される土質条件は整っておらず、すべり面を貫いて生育する根が崩壊防止機能を発揮するという考え方は適切ではない。
- ③豪雨などにより多量の雨水が表層土中に浸透すると、表層土の自重が増え、表層土を斜面下方に崩壊させるせん断荷重が徐々に増える。この場合、薄いすべり面は発生せず、表層土全体が斜面下方に向かって徐々に変形を起こし、崩壊に至るのではないかと推察できる。
- ④表層土全体に分布する根は鉄筋コンクリート内の鉄筋のように表層土の変形を抑制して崩壊防止機能を発揮すると考えられる。