

図 3.21 では、 ΔC (ΣA) マップと Wr マップの評価ランク（４段階）の差分を表しているが、 ΔC で評価が１ランク高く（崩壊防止機能が高く）出ている箇所が黄色となり、主にスギ林の範囲に黄色が多い。逆に ΔC で評価が１ランク低い箇所は水色としたがヒノキ林の範囲が多くなった。これより、 ΔC マップは Wr マップに比べスギ林で機能がやや高く出る傾向、ヒノキ林でやや低く出る傾向となることがわかった。

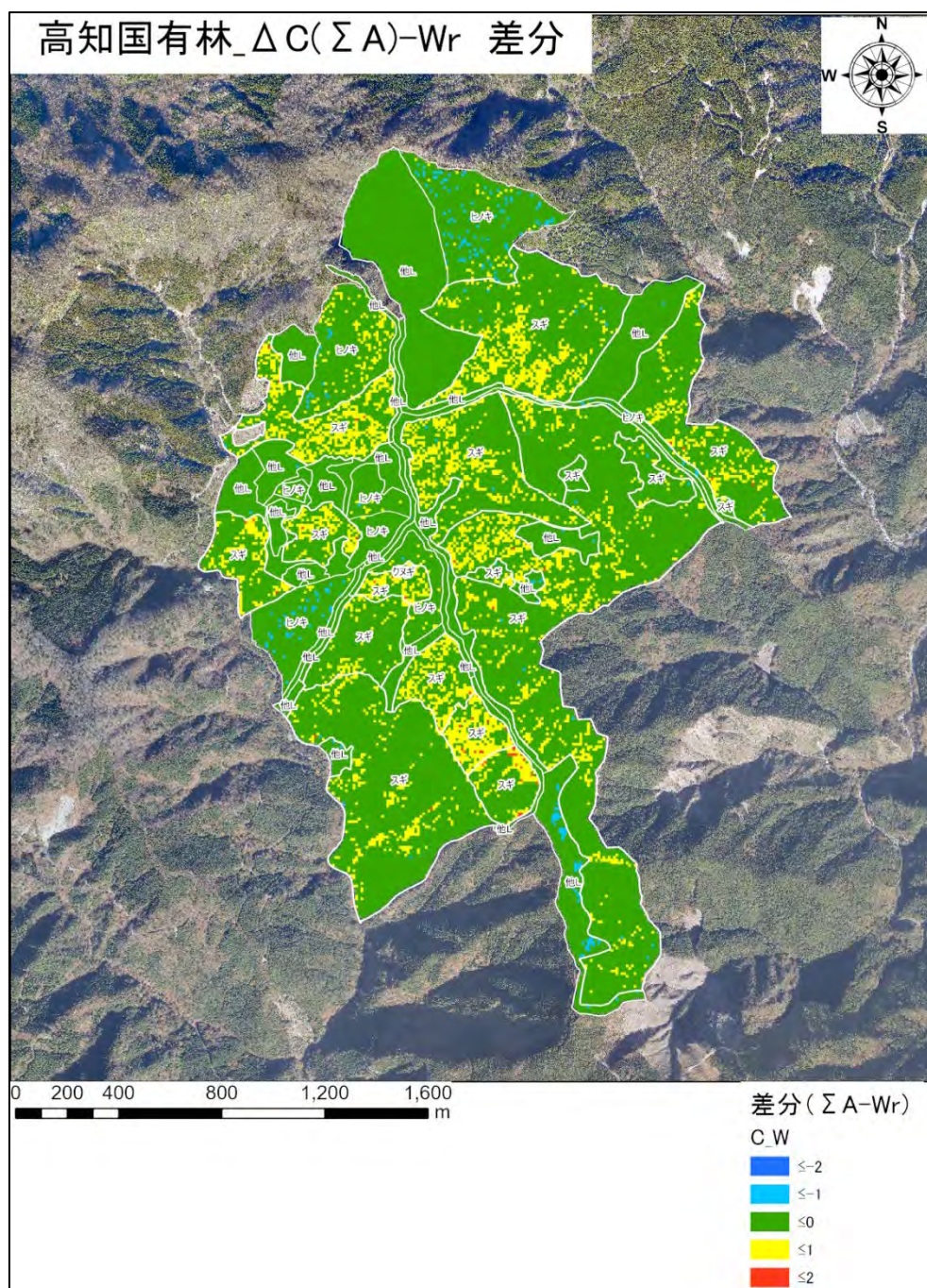


図 3.21 ΔC (ΣA) マップと Wr マップのランク差分

4. 崩壊防止機能区分図の評価

森林の「崩壊防止機能区分図」について、林野庁手引 2016 の P 値によるもの、根系による断面抵抗 ΔC を用いた区分図、土塊内に存在する根量 Wr を用いた区分図の 3 種類がある。「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、検討した。

4.1 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、本業務においてそれぞれをどう活用するかについて検討した。

4.1.1 現地調査結果でみる ΔC と Wr

本年度の現地調査（5 箇所）で得られた ΔC と Wr の散布図を示す（図 4.1）。

現地掘削により取得された ΔC は、赤い範囲で囲われた ΔC が 10kN/m^2 未満のグループと、青い範囲で囲われる ΔC が 10kN/m^2 以上のグループが存在する。本業務委員会においてこれまでに根系による ΔC が 10kN/m^2 を超過することはごく稀である、と指摘をいただいております、青い範囲のデータは過大な ΔC が計測されている。

ΔC が過大となる理由としては、調査断面が幅 $1\text{m} \times$ 深さ $0.5\text{m} = 0.5\text{m}^2$ であり狭い範囲のデータ計測である点があげられる。

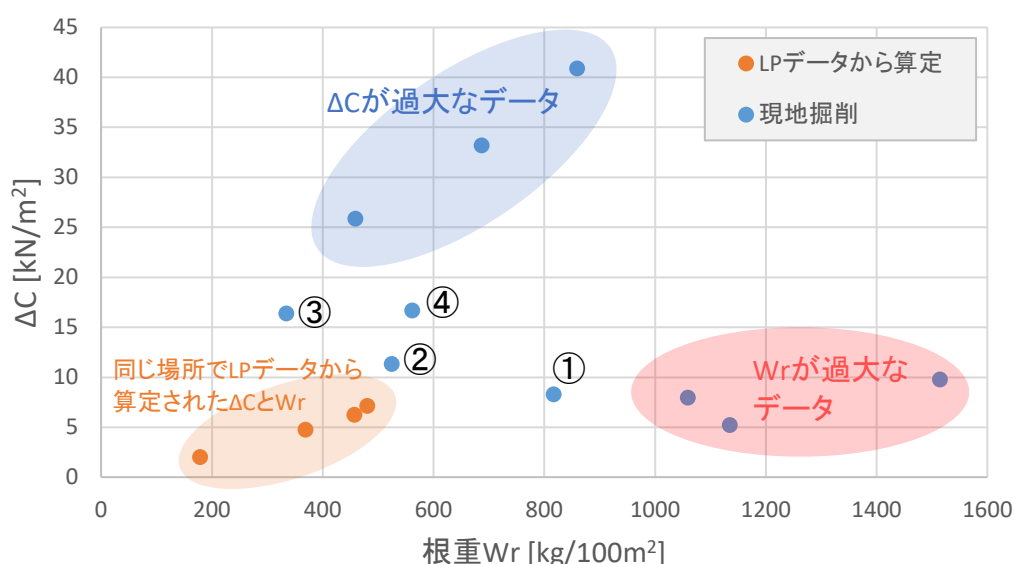


図 4.1 現地調査で得られた ΔC と根重 Wr の関係

図 4.1 には LP データ解析から得られた掘削調査実施箇所の ΔC と Wr をプロットした。LP 解析は比較的広い範囲（10m グリッド）に存在する立木情報を平均化している。そのため、具体的な 2 立木間を調査している現地掘削データと比べると、ばらつきが抑制されており平均的な評価をしている

といえる。

根系の伸長状況を視認するレベルにおいては、 ΔC または Wr が過大となった掘削箇所と、①～④のように比較的平均的なデータが取得された箇所の違いは判然としない。大きな水平根が存在すると過大値がでやすいかと思われたが、③④では大きな水平根が存在していたものの過大とはならない場合もあった。

4.1.2 ΔC と Wr の相関関係

ヒノキ、スギの散布図に今回実施した現地調査による ΔC と Wr のデータを散布したのが図 4.2 である。ヒノキ、スギとも ΔC と Wr のあいだには強い正の相関がみられる。

ヒノキとスギでは根系が発揮する抵抗力 ΔC と根重量 Wr の範囲に差があり、ヒノキよりもスギが全体に大きな ΔC と Wr となる。図中には広島ヒノキの累乗回帰線 ($\Delta C = 0.0014 Wr^{1.3588}$) を描画した。回帰線はヒノキデータに対するものだが、スギデータも概ね回帰線上に位置し、両者はほぼ共通とみなしてもよい結果となっている。

以上の検討より、 ΔC と Wr のあいだには正の相関関係があると判断される。

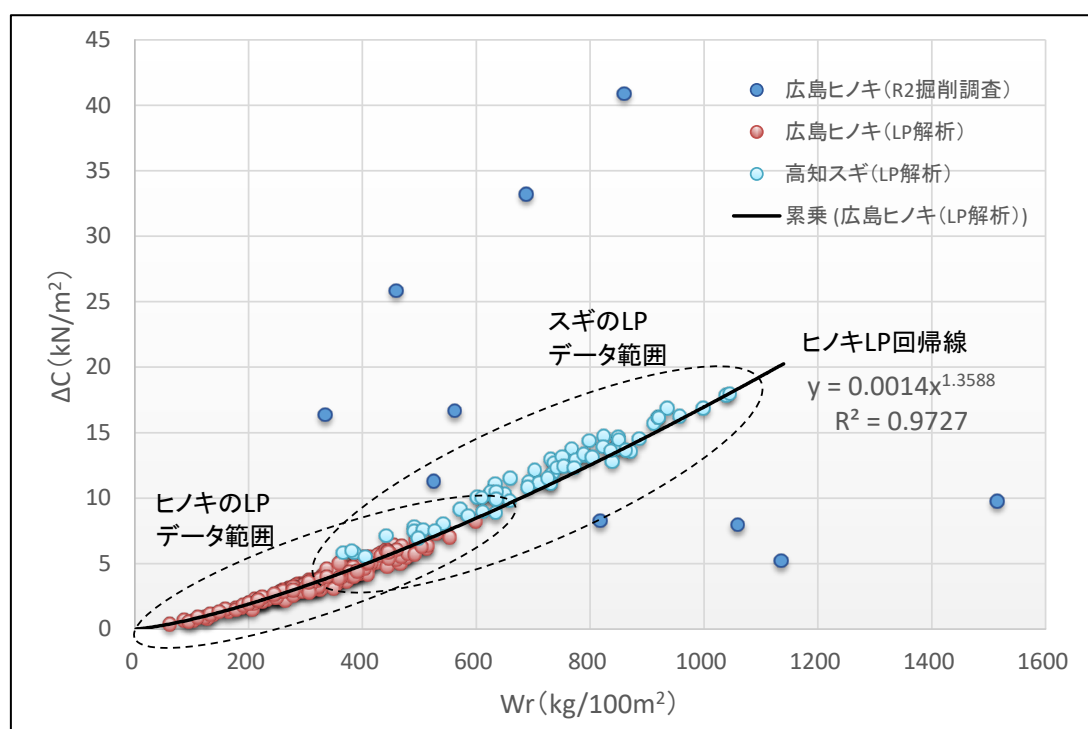


図 4.2 ΔC と Wr の相関図

4.1.3 P、 ΔC 、 Wr の相互比較

(a) 対象データ

広島野路国有林で取得された航空 LP データを対象に実施した 17、675 本の樹木を対象とする。

樹種区分は以下の 3 種である。

- ・ヒノキ
- ・アカマツ
- ・広葉樹

(b) Wr と ΔC

図 4.3 は、同じデータ（立木密度、胸高直径）から算定された Wr と ΔC を比較したものである。なお図 4.3 は、10m グリッドごとに Wr と ΔC をプロットしている。両者ともに概ね同じ回帰線が得られている。

■ Wr - ΔC 回帰線

(10m グリッド) : $\Delta C = 0.0009 Wr^{1.4387}$

ただし、 Wr : kg/100m²、 ΔC : kN/m²

同じデータから算定した Wr と ΔC の相似度は非常に高く、決定係数 R^2 は 0.99 に達する。令和元年度に広島を対象に作成した Wr マップと ΔC マップの比較では黄色と緑色で単純に色比較をしていたため、相応に異なる領域が存在していた。これは第 1 回委員会で執印委員からいただいた「 Wr と ΔC マップはクラス分けをしていることから、ランクの整合性が重要」というご指摘どおり、両マップのクラス分けの差異があらわれていたと考えられる。

このように図 4.3 のように散布図で比較すると、同一データ（立木密度、胸高直径）から求まる Wr と ΔC は概ね 1 対 1 で対応する指標としてよい。

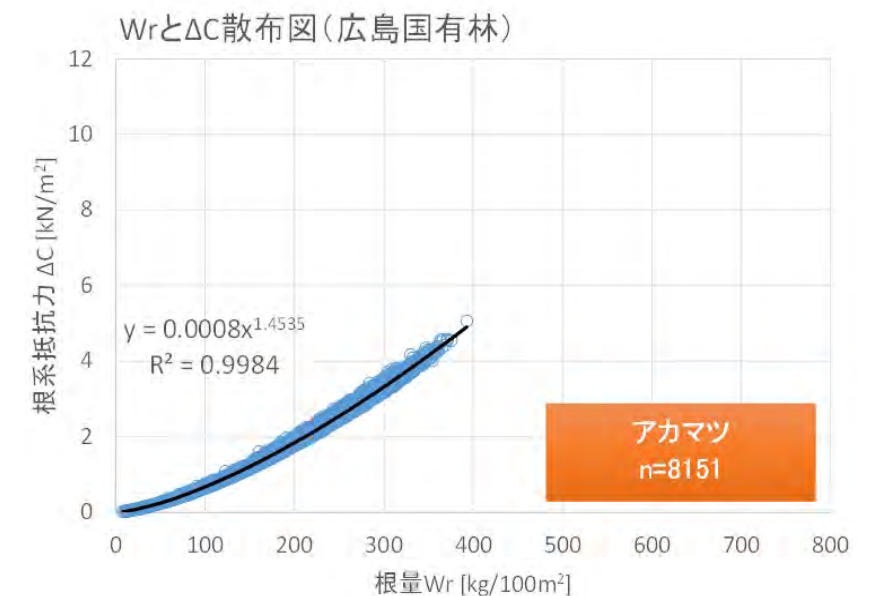
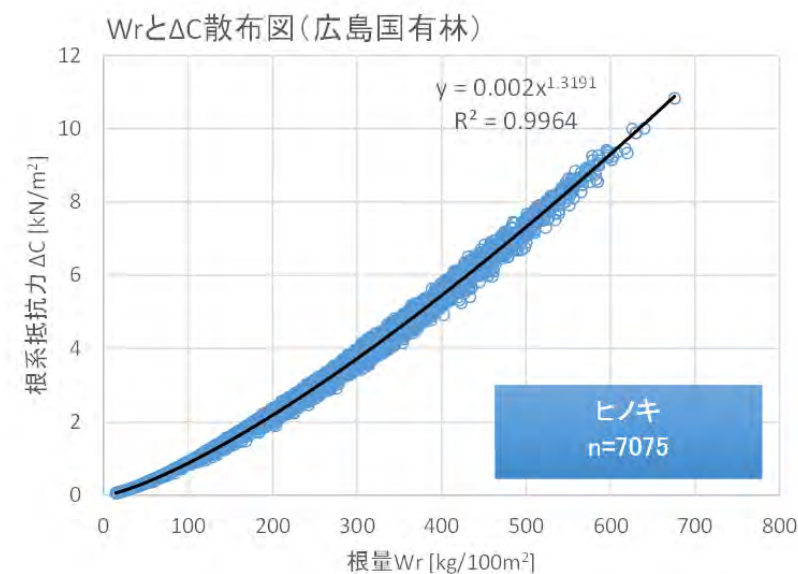
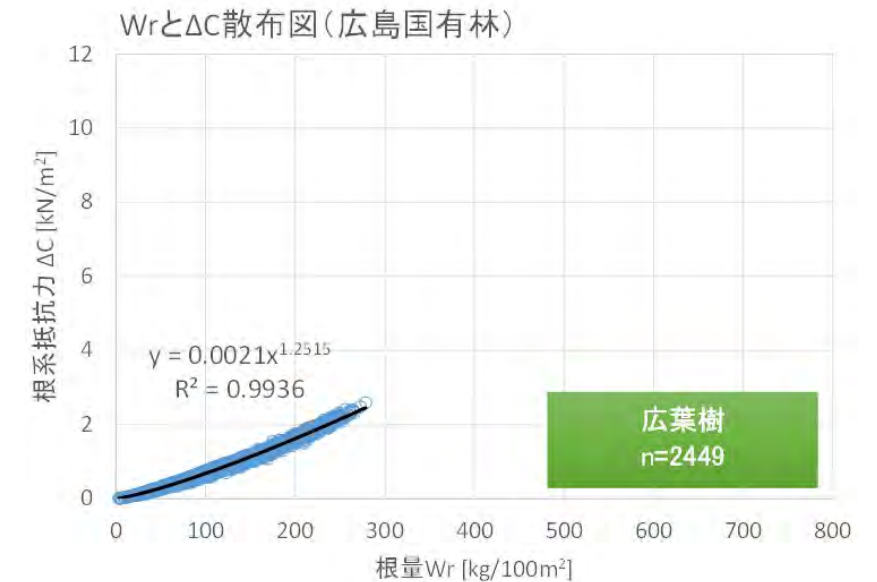
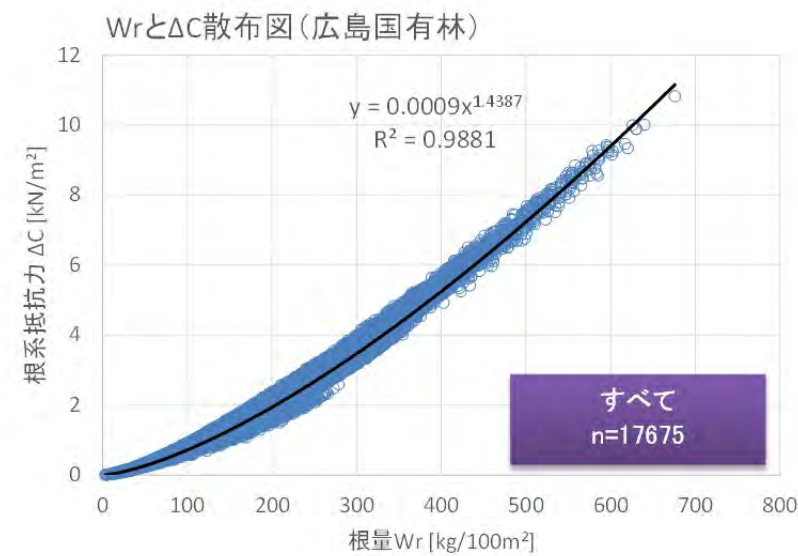


図 4.3 同じデータより算定された Wr と ΔC の比較 (10m グリッド)

(c) Wr と手引の評価点 P

図 4.4 は、同じデータ（立木密度、胸高直径）から算定された Wr と林野庁手引 2016 による崩壊防止機能評価点 P を比較したものである。

手引による評価点、 Wr と ΔC すべて同じデータから算定している。 Wr と ΔC がほぼ 1 対 1 で対応するのに対し、 Wr と評価点 P のばらつきは非常に大きい。決定係数 R^2 は 0.28～0.33 と小さな値である。手引は基本的に北原の ΔC 研究成果に基づく評価点設定がなされているが、手引の崩壊防止機能は、同じデータから算定される Wr 、 ΔC と同様の値とはいえない状況である。

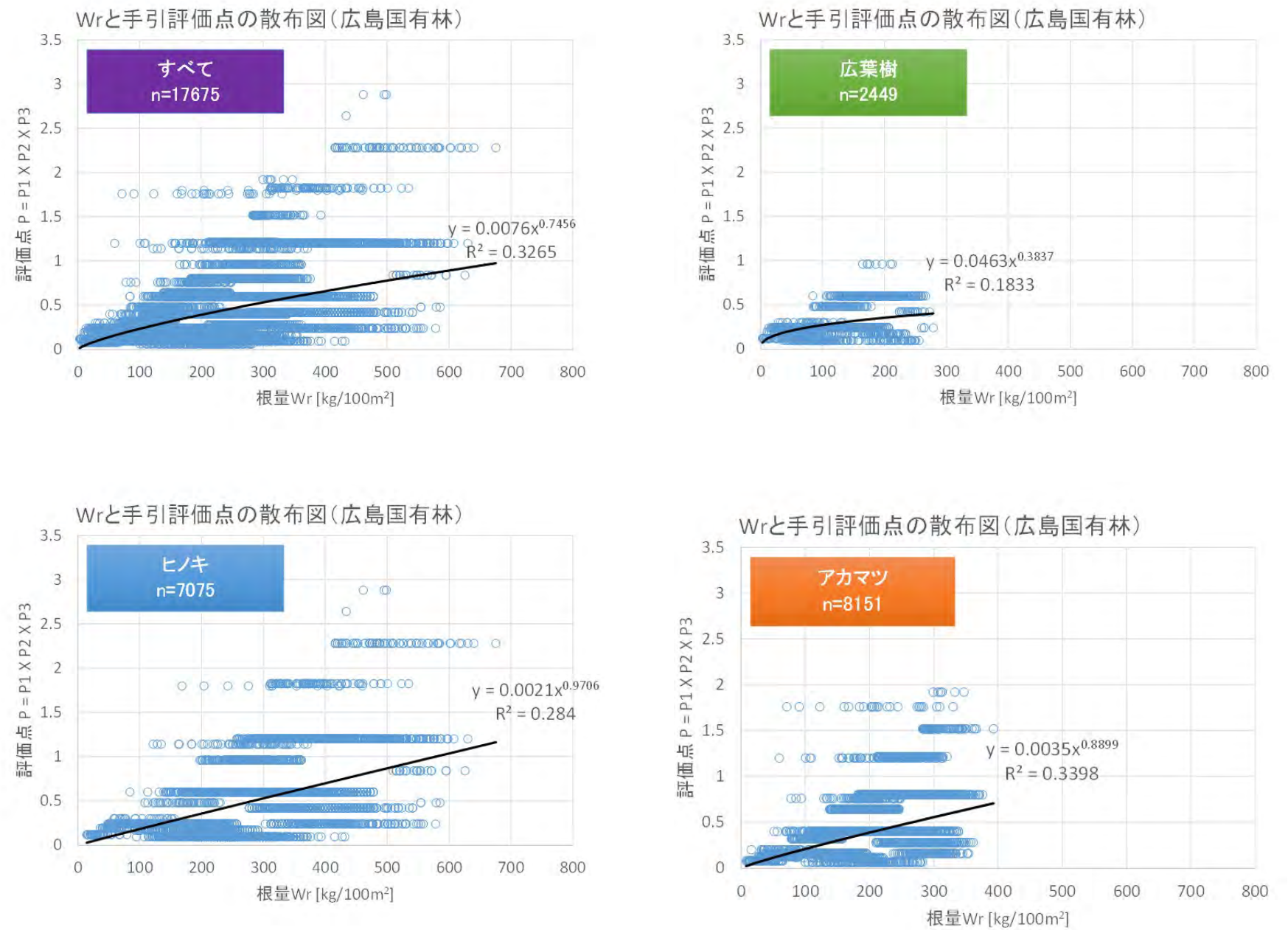


図 4.4 同じデータより算定された Wr と手引評価点 P の比較

(2) 現地調査結果と重ねあわせてわかること

図 4.5 は先の図 4.2（現地調査で得られた $\Delta C(\Sigma A) \sim W_r$ 散布図）に、データが存在する範囲にハッチングを追記したものである。現地調査は局所で取得したデータであることから、その結果はだいぶばらつきがあり存在範囲は広い。図中には LP データ解析で得られた $\Delta C(\Sigma A) \sim W_r$ 散布図も併記しているが、こちらは胸高直径や樹高といった林分情報にもとづき従来の調査研究を踏まえた統計的な樹木諸元（胸高直径、根量等）の関係式を用いており、情報を平均化して評価した場合の $\Delta C(\Sigma A) \sim W_r$ 関係だといえる。

図 4.6 は、手引の評価点 P を縦軸とした $P \sim W_r$ 散布図（図 4.4 のヒノキ）に同じくデータ存在範囲をハッチング追記したものである。図 4.5 と図 4.6 のハッチング範囲はよく似ている。

$P \sim W_r$ 関係は、 $\Delta C(\Sigma A) \sim W_r$ 関係に比べ非常にばらつきが大きい、それは両者が以下のように異なる種類の指標であるため、ということがわかる。

■手引の評価点 $P \sim W_r$ 関係

P と W_r は基本的には単調増加関係にあり、根重 W_r が大きければ手引の評価点 P も大きい傾向だが、そのばらつき範囲は非常に大きい。回帰の決定係数は 0.2~0.3 程度。そのばらつき範囲は本年度の現地調査で取得された $\Delta C \sim W_r$ 関係と同程度であり、実際にあり得る範囲のばらつきである確証が得られた。

■ $\Delta C(\Sigma A) \sim W_r$ 関係

胸高断面積合計から算出する $\Delta C(\Sigma A)$ と根重量 W_r はどちらも従来の調査研究を踏まえた統計的な樹木諸元（胸高直径、根量等）の関係式に基づく算定値である。性質上林分の平均的な代表値をあらわしており、 $P \sim W_r$ 関係と比べると $\Delta C(\Sigma A) \sim W_r$ 散布図は非常に収束した範囲のプロット図となる。回帰の決定係数は 0.96~0.99 程度。回帰式により $\Delta C(\Sigma A)$ と W_r は相互変換が可能であることから、林分の地上部データ（胸高直径、樹高等）に基づき $\Delta C(\Sigma A)$ もしくは W_r を推定する場合はどちらを使っても同じ結果が得られる。

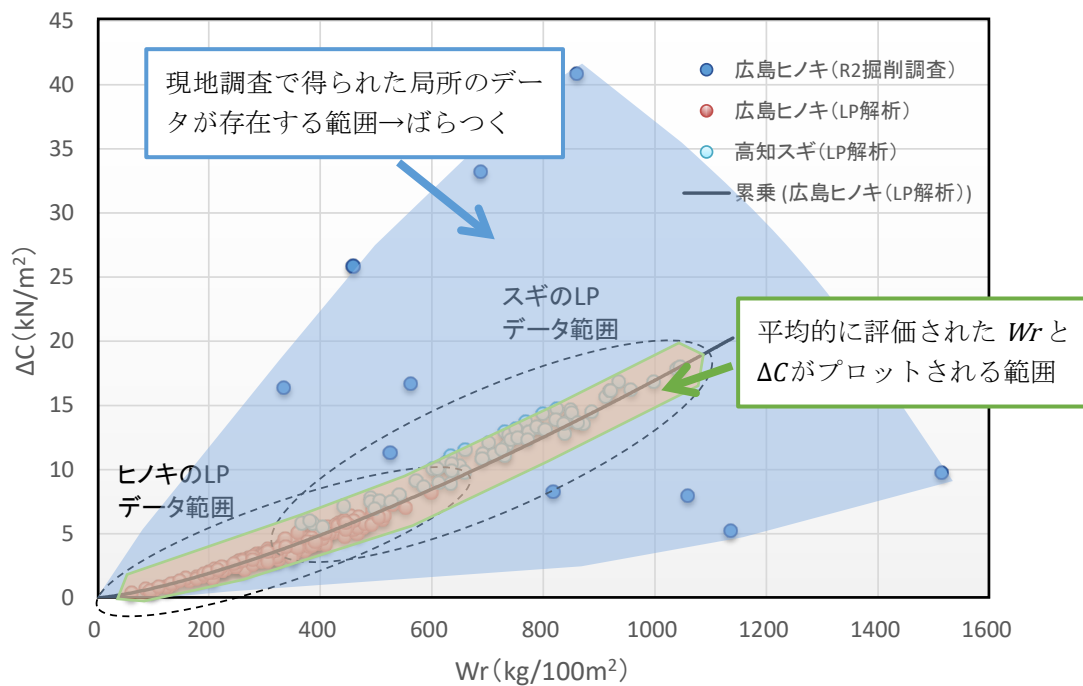


図 4.5 現地調査による $\Delta C \sim Wr$ 散布図のばらつく範囲 (図 4.2 にハッチングを追記)

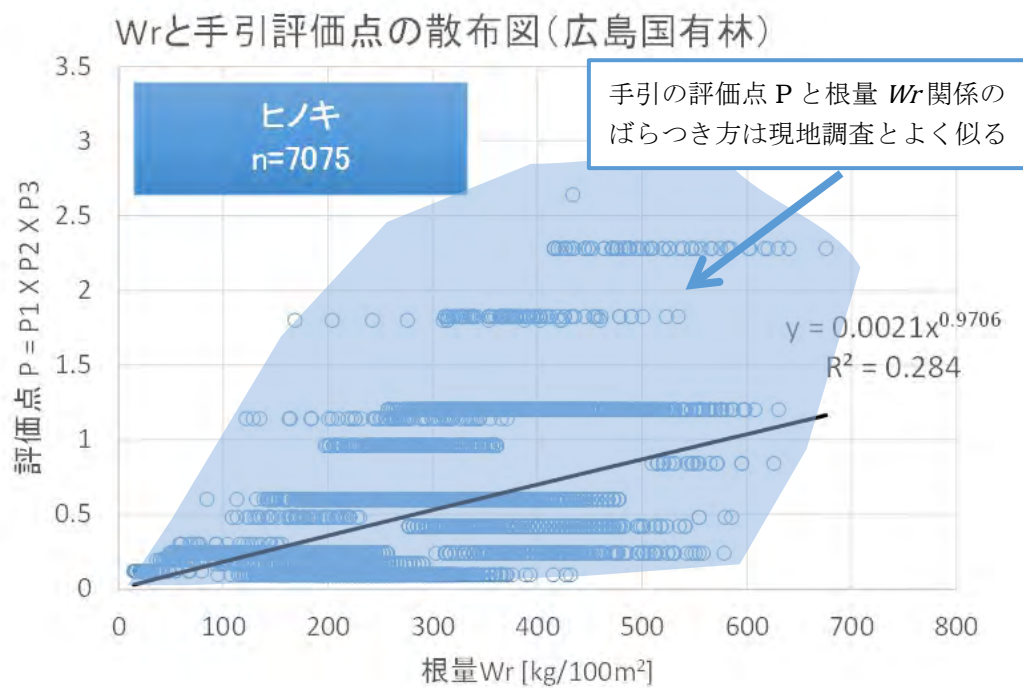


図 4.6 手引評価点 $P \sim Wr$ 散布図のばらつく範囲 (図 4.4 ヒノキに加筆)

5. まとめ・次年度計画

平成 31 年度～令和 2 年度にかけて検討を行った結果、現時点で以下の知見を得た。

5.1 本業務で得られた成果

(1) 崩壊防止機能評価の指標について

森林根系による崩壊防止機能について、その評価指標を以下のように整理する。

- 手引の評価点 P 、胸高断面積合計に基づく $\Delta C(\Sigma A)$ 、根重量 Wr という 3 種の評価指標が存在する。
- $\Delta C(\Sigma A)$ と Wr の両者の定義は異なるが、地上部情報に基づく崩壊防止機能の評価指標として使うかぎりでは回帰式により相互変換が可能で、概ね同じ指標とみなせる。
- 手引の P は胸高直径の評価法が異なり、他 2 つの指標と異なる傾向を示す。
- $\Delta C(\Sigma A)$ と Wr は統計処理された平均的な林分情報を取り扱う指標となっている。
- 手引の P は実際の現地データと同レベルのばらつきを内包しており、平均的な評価ではなく幅広い林分のありようをカバーした指標となっている。
- 手引の P は小径木をあまり評価せず、大径木を積極評価する。したがって、太い根の伸長を促す施業誘導に適した指標とみなせ、根系が発揮する杭効果に相当するとみなせなくもない。
- $\Delta C(\Sigma A)$ (または根量 Wr) は本数密度が高い林分でも根量が十分にあれば高評価につながることから、手引と比較すると細根の存在を崩壊防止機能として評価する傾向にある。したがって、斜面内に形成される樹木根系によるネット効果を評価する指標とみなせなくもない。

(2) 森林施業と崩壊防止機能について

ここまで、森林の崩壊防止機能について樹木の地上部情報を基に定量評価する方法を整理検討してきた。その中で $\Delta C(\Sigma A)$ と手引の P を使うと幅広く森林が有する崩壊防止機能の評価できることが判明した。

次のステップとして、崩壊防止機能を高めるためにはどのような森林施業を計画するのがよいのか、を見定めていく必要がある。本事業が目指す森林の表層崩壊防止機能を最大限発揮させるためにどのような森林を指向するのか、そのような森林に仕立てるために必要な施業はどのようなものか、検証していくための道すじとして現時点での概案を以下提案する。

1. 崩壊防止機能が相対的に低い林分

- 崩壊防止機能を手引の評価点 P と胸高断面積合計に基づく ΔC の 2 種類で評価する。

- 手引の評価点 P および ΔC の面的分布が把握できるよう GIS 上で P マップおよび ΔC マップを作成する。作成単位はグリッドまたは小班単位とする。
- P マップ上で崩壊防止機能ランクが赤(a)と黄(b)ランクとなった林分、かつ（または） ΔC マップで $\Delta C < 6$ [kN/m²]となった林分を「崩壊防止機能が相対的に低い林分」と位置づける。

※下線部分：第3回委員会で執印委員より、「かつ」でよいのでは、との意見があった。最終的には「かつ」「または」の両者について検討した上で、優先度の設定を行うのがよいと指導いただいている。

2. 優先度の設定

- 「崩壊防止機能が相対的に低い林分」の中から優先的に防災機能を高める施業対象とする林分を、以下の複数の観点を踏まえ総合的に検討する。
 - ・大面積林分、傾斜方向に連続する林分など、地形・地質素因が崩壊発生をもたらしやすい箇所。
 - ・崩壊発生により被災が想定される保全対象の有無。
 - ・災害危険地区、または手引に規定される山腹崩壊危険度判定等、治山で用いられる各種崩壊指標との突き合わせ、位置関係。

※本事業の主旨を踏まえると、1. で森林の崩壊防止機能が低位なところを特定しそのまま当該箇所の対策を求める、というものではない。崩壊防止機能が低位というだけでなく、その他の情報、例えば山地災害危険地区や森林整備計画の中での位置づけ等を踏まえ、対策や森林整備の方針を考慮していく必要がある。森林整備のやり方によって崩壊に強い斜面にできる（安全度を向上できる）、山地災害危険地区でないところでも整備が適切に行われていなければ危険性がある斜面と認知できるなど、斜面の危険度を加味した形での評価とする。

3. 施業計画への反映

- 2. の検討により優先度が高いとされた林分について、将来成長時の本数密度、胸高直径を推定し、10年後、20年後に予測される評価点 P および ΔC において「崩壊防止機能が相対的に低い林分」に該当するかどうか検証する。
- 概ね 20 年後の予測において「崩壊防止機能が相対的に低い林分」のままである場合は、そうならないように本数密度または胸高直径の目標値を設定する。
- 目標値を達成するために当該林小班での施業のあり方（密度管理、伐採・間伐計画等）を策定する。

5.2 次年度計画案

5.2.1 残された課題

本年度は広島県ヒノキ国有林で根系調査を行い、 ΔC と Wr を現地取得した。その上で ΔC と Wr の位置づけと活用方法についてある程度の道筋を与えることができた。今後、残された課題として以下をあげる。

1. 現地調査（スギ根系）

本年度広島国有林でヒノキ根系に関する ΔC と Wr の現地掘削調査を実施した。今回、 ΔC と Wr に関する整理検討は、その多くがヒノキのデータによる。実際の森林施業はスギ林の割合が多いことから、スギ根系に関する現地調査を実施し ΔC と Wr についてのバックデータを取得しておくことが望ましい。

2. ΔC の適正な閾値を決定する

本年度高知県スギ林のLPデータ解析に基づき、手引の閾値と足並みをそろえる形で $\Delta C > 6$ [kN/m²]を「機能向上が必要な林分」の閾値として提案した。これを適正值としてよいか、ヒノキ林や四国以外の別地域での閾値をどうするか、検証の余地が残されている。

3. 施業履歴情報の活用

ここまでの調査結果からは、施業履歴が森林根系の状態にどう影響するか、そのちがいを特定できていない。今後、施業履歴情報をどう取り扱っていくのか、見定めが必要である。

4. 森林整備手法の具体的なオプションを構築

評価点Pマップおよび ΔC マップを用いて特定された、崩壊防止機能が相対的に低い林分には幼齢林～老齢林まで様々な林齢の森林が含まれることが想定される。そうした林分に対する施業として、本数調整のみならず老齢林などでは複層林への誘導など、様々な施業のあり方が考えられる。森林整備手法において幅広い選択肢、オプションを提示することが望まれる。例えば、本数調整では列状間伐を採用することも多いが、表層崩壊防止機能を高めるための密度管理では列状以外を用いる等、具体的な森林整備計画への落とし込みについて検討が必要である。

次年度は、実際にどのような森林整備手法が崩壊防止機能として有効なのか、現地検討会等で森林をみながら検討する機会を持つことが望ましい。現地検討会では例えば、次のような検討を行うことが想定される。

- ・密度管理のために間伐したものの（費用対効果を重視して）列状間伐であったために崩壊に至った箇所において、やはり定性間伐が望ましいのか、○伐○残までなら問題ないか。

- ・上木密度だけをみれば疎林であり、 ΔC の評価も低いが下層植生がある程度発達して

いたため崩壊しなかった林分において、下層植生はどの程度評価できるのか、など。

5. 林分の立地に応じた根系状況の推定と施業計画

森林総合研究所が実施している研究プロジェクトにおいて、立地に応じた根系調査が実施されている。2020 年度に研究成果がまとまる予定のため、この研究成果を受けて、林分が立地した箇所の地質、土壌、勾配、土層厚といった立地情報と森林根系の関係について把握できているものを取り込み、本業務で提案する施業のありかたに反映させることを検討する。

5.2.2 次年度計画案

当初の本業務 4 カ年計画案では、上記「4. 森林整備手法の具体的なオプション構築」に該当する項目が含まれていない。また、スギ根系の現地調査が 2021 年度に継続して加わることから、いくつかの項目を追加した新たな 4 カ年計画案を作成した。

表 5.5 当初の 4 カ年計画案

	2019	2020	2021	2022
広島・愛媛データ解析				
課題 1・崩壊防止機能区分図				
課題 2・施業履歴情報				
現地調査（課題 3，4 対応）				
課題 3・新たなメカニズムの確立				
課題 4・根量のめやす指標				
森林整備の優先順の決め方				
立地環境に応じた施業のあり方				
ガイドライン案の作成				

表 5.6 見直し後の 4 カ年計画案

	2019	2020	2021	2022
広島・愛媛データ解析			完了	
課題 1・崩壊防止機能区分図			完了	
課題 2・施業履歴情報				継続検討
現地調査（課題 3，4 対応）				継続スギ林
課題 3・新たなメカニズムの確立				80%完了
課題 4・根量のめやす指標				80%完了
森林整備の優先順の決め方				
森林整備手法の具体を検討				
現地検討会（施業オプション）				
立地環境に応じた施業のあり方				
ガイドライン案の作成				

- 課題 3・新たなメカニズムの確立

手引の評価点 P 、 ΔC 、 Wr といった崩壊防止機能の定量評価方法について、仕上げの総括を行う。本年までに整理した考え方をさらに具体的な方法に落とし込み、手順書等の形式にとりまとめる。また、 $\Delta C < 6$ [kN/m^2] は四国のスギ限定の数値であるため、他の地域、樹種についての閾値を検討する。

- 課題 4 ・ 根量のめやす指標

本年度の検討により、根量の推定を苧住の根現存量式を使うなど統計的手法で行う場合は、 ΔC と Wr は概ね同じ指標とみなせることがわかった。その限りにおいては Wr を使う必要性は希薄だが、 Wr は土塊のせん断変形を抑制するというネット効果を発揮する、という視点から ΔC とは異なる指標としての活用が可能か検討を行う。

- 森林整備の優先順の決め方

5.1 (2) 2. に記載した内容。

土砂崩壊防止機能が相対的に低い林分について、地形条件、保全対象、山地災害発生の危険度等、複数の観点を総合的に勘案して優先順の設定方法について検討する。

- 森林整備手法の具体を検討

5.2.1 の 4 に記載した内容。

森林施業として、本数調整のみならず老齢林などでは複層林への誘導など、様々な施業のあり方が考えられる。森林整備手法における幅広い選択肢、オプションを提示する観点から、現地の多様な条件を踏まえた施業内容を検討する。

- 立地環境に応じた施業のあり方

5.2.1 の 5 に記載した内容。

森林総研が実施する研究プロジェクト成果を活用し、林分が立地した箇所の地質、土壌、勾配、土層厚といった立地情報と森林根系の関係のうち活用できる知見を取り込み、森林施業のありかたに反映させることを検討する。

- 現地調査（スギ根系）

5.2.1 の 1 に記載した内容。

スギ林における ΔC と Wr に関する現地データを取得する。

- 現地検討会（森林施業について）

5.2.1 の 4 に記載した内容。

実際の森林をみながら、崩壊防止機能を高めるための施業としてのオプション、施業種などについて検討を行う。

6. 検討委員会

本業務では、専門的な見地から検討を行うため、の学識経験者4名を委員とした検討委員会を表に示す日程で実施した。

ここでは議事内容の概略を記す。

表 6.1 検討委員会の委員

	氏名	区分	所属	第1回 委員会 出欠	第2回 委員会 出欠	第3回 委員会 出欠
委員 (座長)	あ べ かずとき 阿部 和時	学識経験者	日本大学生物資源科学部 特任教授	○	○	○ Web 参加
委 員	しゅういん やすひろ 執印 康 裕	学識経験者	宇都宮大学農学部 教授	○ Web 参加	○ Web 参加	○ Web 参加
	だいまる ひろ む 大丸 裕 武	学識経験者	森林総合研究所 研究ディレクター	○ Web 参加	×	○ Web 参加
	やませ 山瀬 けいたろう 敬太郎	学識経験者	兵庫県森林林業技術センター 主席研究員	○ Web 参加	○ Web 参加	○ Web 参加

※第三回委員会は首都圏において、緊急事態宣言下であったため、フルオンライン参加の委員会開催。

表 6.2 検討委員会の実施日程

検討委員会	実施日	検討内容
第一回	R2.7.31	調査目的、計画の説明と調査実施についての協議、指導 ・広島根系調査の実施に係る検討方針 ・エリートツリー調査対象地、対象木、調査内容と方針
第二回	R2.11.27	おもな調査結果の報告と分析に関する協議、指導 ・広島根系調査、エリートツリー調査、スギ林調査、崩壊防止機能区分図の評価点算定手法の精査
第三回	R3.2.26	施業履歴を評価手法に関する協議、指導 次年度以降の調査提案 今後の課題