

DEM データを活用した高性能林業機械使用基準マッピング

○信州大学農学部 学部 4 年
教授
北信州森林組合

唐澤 亮
加藤 正人
堀澤 正彦
南都 寛

要旨

生産性と林業従事者の安全性向上のために、高性能林業機械の普及は日本林業の重要な課題となります。そこで普及を補助する要素として、DEM(数値標高モデル)データを用いた傾斜区分から森林内における高性能林業機械使用基準を視覚化することを目的としました。また、使用基準を用いて高性能林業機械によって伐倒可能な立木と伐倒不可能な立木を分類し、高性能林業機械導入の判断材料としての有用性について評価と考察を行いました。結論として、分類結果から機械化による費用対効果を把握することで、各事業体は高性能林業機械導入を検討できると考えました。

はじめに

日本の森林は人工林の蓄積が年々増加しており、この半世紀でその資源量は、約6倍に増加しています。さらに、人工林の半数が主伐期を迎えており、森林資源はかつてないほどに充実しています。林業としては、国産材の生産量の増加、木材自給率の上昇など、活力を回復しつつあります。しかし、森林蓄積量に対する木材生産量の比率を諸外国と比較すると、日本は北欧諸国などの林業先進国の5分の1程度という状況です。要因の1つとして、高性能林業機械の普及が進んでいないことが挙げられます。日本では未だにチェーンソー伐倒が主流であり、低い生産性と高い労働災害率を招いています。一方、先進国はハーベスタ等の高性能林業機械での伐倒を主流としており、日本の約3倍となる高い生産性を持ちます。また、先進国は労働災害率が日本の5分の1以下です。生産性と林業従事者の安全性向上のために、高性能林業機械の普及は重要な課題となります。

高性能林業機械の普及が進まない理由として、次のものがあります。

- ・林内作業や走行が可能な高性能林業機械が少なく、使用範囲が限定される。
- ・導入費及び維持管理費が高い。
- ・高性能林業機械を使用できるかの客観的な判断基準がない。

これらの課題に対して、DEMデータを用いた傾斜区分から森林内における高性能林業機械使用基準を視覚化することを目的としました。また、使用基準を用いて高性能林業機械によって伐倒可能な立木と伐倒不可能な立木を分類し、高性能林業機械導入の判断材料としての有用性について考察しました。

1 研究方法

本研究は大きく分けて2つの流れで行いました。

1つ目は[A]高性能林業機械使用基準マッピングです。まず、A1として高性能林業機械の作業可能斜度について、安全面を考慮した指標や規制があるかを調査しました。次に、A2として高性能林業機械の作業限界傾斜を中心とした性能を調査しました。続いて、A3としてDEMデータから傾斜区分図を作成しました。最後に、A4として作業限界傾斜と傾斜区分図の双方を掛け合わせ、高性能林業機械使用基準をマッピングしました。

2つ目は[B]高性能林業機械による伐倒可否の分類です。ここではAの高性能林業機械使用基準を用いて分類を行いました。まず、B1として調査地における本研究の対象木を抽出しました。次に、B2として高性能林業機械による伐倒可否の分類基準を定義しました。続いて、B3として分類基準を基に対象木に対して、伐倒可否の分類を行いました。最後に、B4として分類結果から評価と総合考察を行い

ました。ここでは、客観的な評価を行うため、林業事業体にご協力いただき分類結果について討論を行いました。

2 調査地の概要

本研究は長野県下高井郡山ノ内町牛首のカラマツ林を調査地としました。北信州森林組合管内で過去2度の間伐が行われています。1度目は2008年、2度目は2017年に行われました。2度目に関しては、詳細なデータが存在します。面積は約9ha、標高は1425～1510m、平均傾斜は約20°です。

3 高性能林業機械に関する聞き取り調査

(1) 使用における規制等の調査-A1

高性能林業機械使用基準の作成において客観性を向上させるため、高性能林業機械の使用における規制等を調査しました。使用基準作成の際には、この規制の範囲内で行うこととしました。規制等の調査は林業・木材製造業労働災害防止協会(林災防)及び国内林業機械メーカー数社への聞き取り調査で行いました。問い合わせた内容は、「林業事業者に対して、安全面を考慮した車両系林業機械の作業可能傾斜度についての指標や制限等はあるか。」というものです。得られた回答から、基本的に路網上での作業が想定されており、林内で作業することは想定されていないということが分かりました。さらに、伐倒機械の限界縦断勾配のデータはなく、機械の構造等についても法規制による規格は存在しないことが分かりました。

(2) 性能調査-A2

ここまでの内容を踏まえて、林内走行型(※1)を想定した高性能林業機械の性能調査を行いました。また、高性能林業機械の中でも特に生産性と林業従事者の安全性向上に寄与する伐倒機械を本研究の調査対象としました。性能調査は国内外林業機械メーカー数社及び林内走行型を実施している林業事業体数社への聞き取り調査で行いました。聞き取り調査に際して、高性能林業機械の使用における傾斜区分の定義を行いました。本研究では高性能林業機械が停止した状態で伐倒作業が可能な傾斜の上限値を作業限界傾斜としました。また、伐倒作業は不可能であるが走行することは可能な傾斜の上限値を走行限界傾斜としました。国内外林業機械メーカーに問い合わせた内容は、「林内における高性能林業機械の作業限界傾斜は何度であるか。」というものです。また、林業事業体に問い合わせた内容は、「①林内における高性能林業機械の作業限界傾斜は何度であるか。」「②林内で使用している高性能林業機械の機種は何か。」「③作業限界傾斜と走行限界傾斜に差異は存在するか。」「④林内作業時の社内での工夫や注意事項等は存在するか。」というものです。各々から得られた回答を整理したものは以下の通りです。

林業事業体から、質問①については各事業体から土質や天候、オペレータの熟練度等が全て好条件であった場合の作業限界傾斜を提示して頂きました。その内容と林業機械メーカーの回答及び質問②の回答を併せて整理した表は、以下の通りです(表3-1)。質問③については、限界傾斜の関係として、作業限界傾斜よりも走行限界傾斜の方が一般的に大きいということが確認できました。本研究では、各事業体の2つの限界傾斜の差から、推定値として作業限界傾斜に5°加算した値を走行限界傾斜としました(式3-1)。質問④については、各事業体から様々な回答が得られました。

※1 林内活用型は高性能林業機械の走行と作業が路網に限らず林内でも行われる施業方法

表 3-1 聞き取り調査による作業限界傾斜

事業体	機械メーカー	種類	作業限界[°]
	K社(国外)	ハーベスタ	25
	M社	フェラーバンチャ	30
		フェラーバンチャ	35
①	K社	ハーベスタ	25
②	H社	ハーベスタ	25
③	C社	ハーベスタ	15
	S社(国外)	ハーベスタ	20

<p>1.作業限界傾斜<走行限界傾斜 2.作業限界傾斜+5° =走行限界傾斜</p>

式 3-1 限界傾斜の関係式

4 高性能林業機械使用基準マッピング

(1) 傾斜区分図の作成-A3

Terrasolid 社の TerraScan 及び MathWorks 社の MATLAB の 2 つのソフトウェアが用いられ、2017 年に対地高度 50m で計測された点群データから DEM を作成しました。本研究はオープンソースソフトウェアである QGIS 3.16 を用いて、作成された DEM から傾斜区分図を作成しました。作成された DEM の解像度はピクセルあたり 0.25m と非常に詳細なデータでしたが、本研究では高性能林業機械の作業可否の視認性を考慮したため、QGIS の機能を用いて解像度をピクセルあたり 1m としました。この DEM(1m) を QGIS の slope 機能を用いて変換しました(図 4-1)。図 4-1 はピクセル毎にデータとして傾斜角が格納されており、それらの値の差を白黒で表示しています。傾斜角を視覚化するために、傾斜角 10° 毎に色分けを行いました(図 4-2)。図 4-2 は傾斜角を視認できますが、地形の起伏を視認することができません。これに対して、より視認性を高めるために、DEM(0.25m) を QGIS の hillshade 機能を用いて変換した画像を重ね合わせて表示しました(図 4-3)。以後、本研究で作成した画像は、slope 変換と hillshade 変換の画像を重ね合わせて表示しています。



図 4-1 slope 変換により得られた画像



図 4-2 傾斜角 10° 毎の色分けにより作成した画像



図 4-3 slope 変換と hillshade 変換の画像を重ね合わせ作成した傾斜区分図

(2) 高性能林業機械使用基準マッピング-A4

3. (2)の内容(表 3-1 及び式 3-1)を踏まえて、マッピングを行いました。傾斜角を4つの区分に分け、区分毎に色分けを行いました。例として、作業限界傾斜 20° の場合を記します。傾斜角の4区分は以下の表の通りです(表 4-1)。1つ目の区分は $0-15^{\circ}$ の作業走行共に可能な路網作設可能傾斜です。この区分は現場での汎用性を高めるためのものです。2つ目の区分は $15-20^{\circ}$ の作業走行共に可能な作業可能傾斜です。3つ目の区分は $20-25^{\circ}$ の走行のみ可能な走行可能傾斜です。4つ目の区分は 25° 以上で、作業走行共に不可能な区分です。QGISにて、4区分で色分けを行いました(図 4-4)。この画像は、調査地の凡例も併せて表示しています。

表 4-1 作業限界傾斜 20° の場合の傾斜角区分

傾斜角区分($^{\circ}$)	作業可否	走行可否	備考
0-15	○	○	路網作設可能
15-20	○	○	作業可能傾斜
20-25	×	○	走行可能傾斜
25-90	×	×	

作成した図 4-4 を拡大した図は以下の通りであり(図 4-5)、少なからずノイズが存在します。これらは以後行う[B]高性能林業機械による伐倒可否の分類や現場での汎用性を考慮した時に芳しくないため、改善を試みました。MATLAB を用いて slope 変換を行った画像の各ピクセルにおける傾斜角に対して平均化処理を行い、再度 QGIS にて4区分で色分けを行いました。作成した画像の拡大図は以下の通りです(図 4-7)。図 4-5 と図 4-7 を比較したところ、ノイズの改善がみられました。本研究ではノイズを改善した画像を採用し、高性能林業機械使用基準の視覚化を完了しました(図 4-6)。

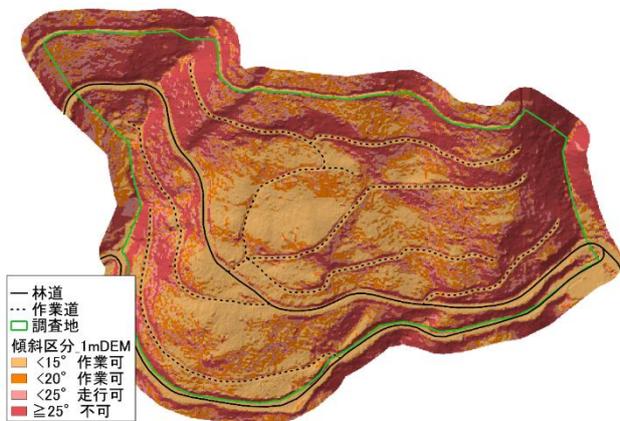


図 4-4 高性能林業機械使用基準をマッピングした図

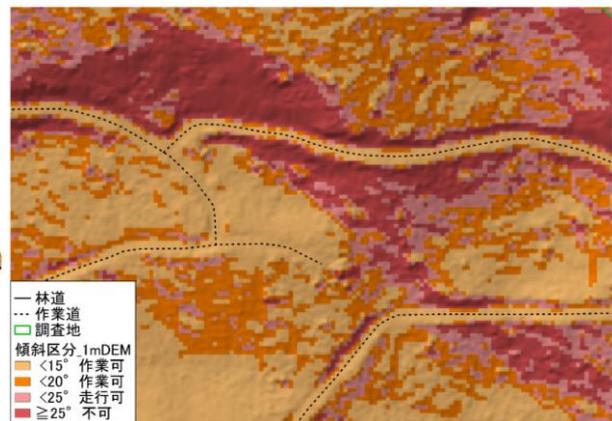


図 4-5 拡大図

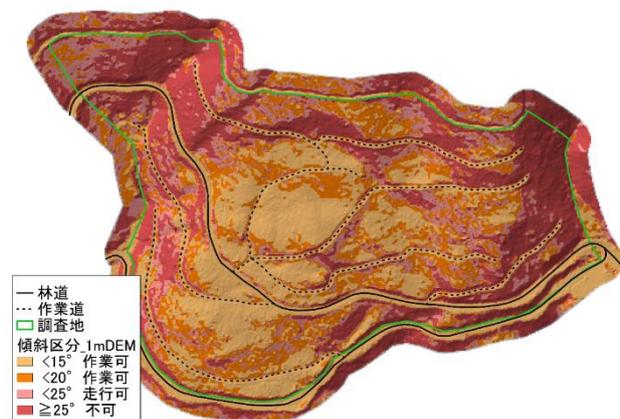


図 4-6 マッピングした図(ノイズ改善)

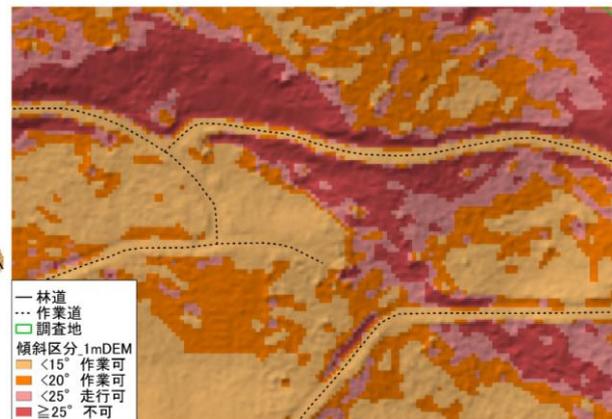


図 4-7 拡大図(ノイズ改善)

5 伐倒可否の分類

(1) 対象木の抽出-B1

対象木の抽出については解析によって作成した樹頂点ポイントデータを使用しました。樹頂点ポイントデータ抽出の解析は、調査地で2017年に行われた間伐の前後それぞれの計測データで行いました。調査地における間伐前の全樹頂点から間伐後の全樹頂点を減算することで、実際に間伐された樹頂点だけを表示することができます(図5-2)。これらを2017年に行われた間伐の間伐木としました。間伐を行った事業者の資料によると、間伐木の約9割が路網活用型(※2)にてチェーンソーで伐倒されています。本研究では調査地で行われた間伐の伐倒においてチェーンソーではなく、高性能林業機械が用いられたと仮定し、林内走行型(※1)の可能性を検討するためにも間伐木を対象木としました。

※2 路網活用型は高性能林業機械の走行と作業が路網上に限られる施業方法

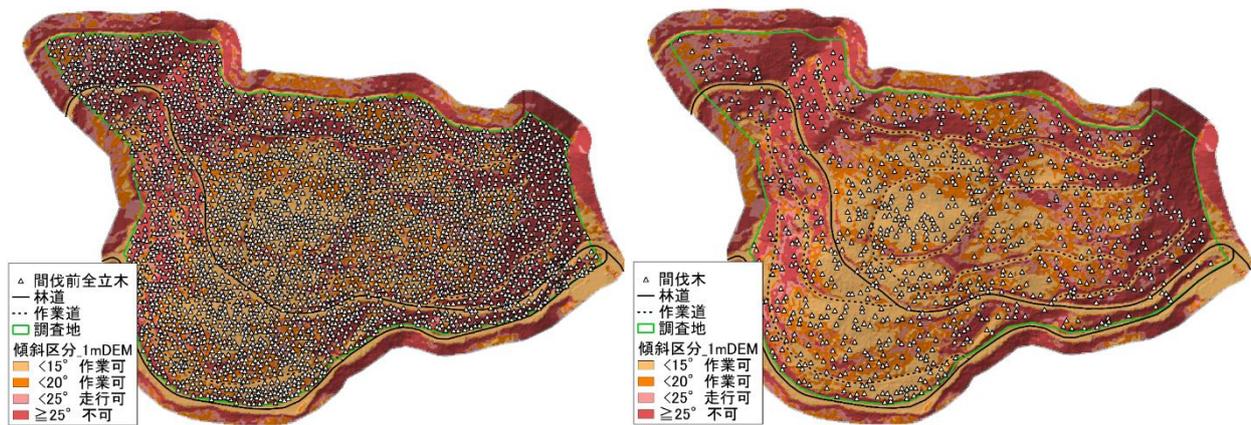


図 5-1 間伐前の全立木

図 5-2 間伐された立木(対象木)

(2) 分類基準の定義-B2

高性能林業機械による伐倒可否の分類基準を定義しました。また、QGIS上で対象木の分類を行うため、高性能林業機械使用基準をマッピングした図(図4-6)のデータとなる画像に対して処理を行いました。ここでも同様に作業限界傾斜を20°としました。作業限界傾斜を用いて、図4-6の画像から傾斜角20°以下の場所をポリゴン化し抽出しました。それらを青色で表示したものは以下の通りです(図5-3)。作成した図5-3を拡大した図は以下の通りであり(図5-4)、丸で囲んでいる箇所のような面積の小さい飛び地が存在しました。傾斜角としては、高性能林業機械が問題なく作業できますが、高性能林業機械の車体サイズを考慮すると面積の小さい飛び地での作業は困難であることが予想されます。

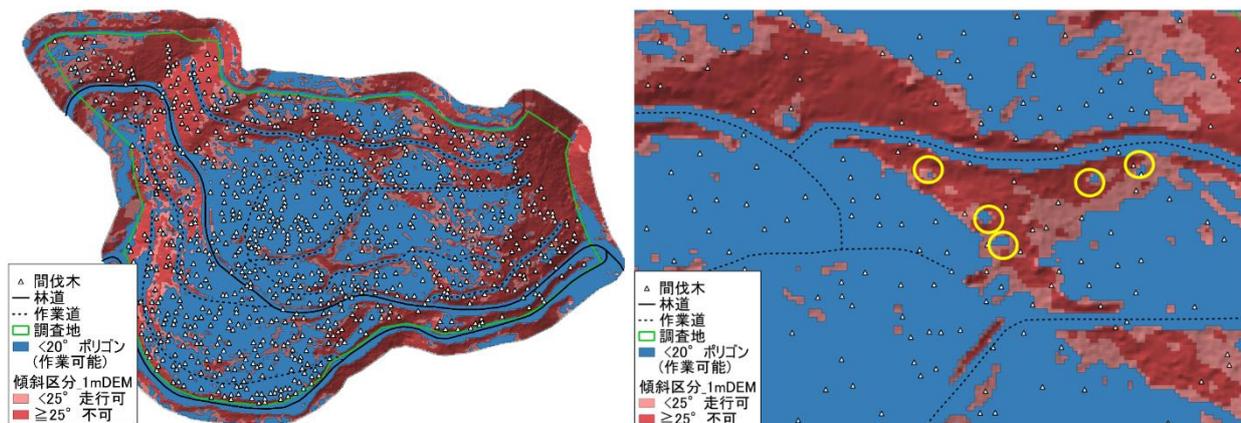


図 5-3 傾斜角 20° 以下青色ポリゴン化(消去前)

図 5-4 拡大図(消去前)

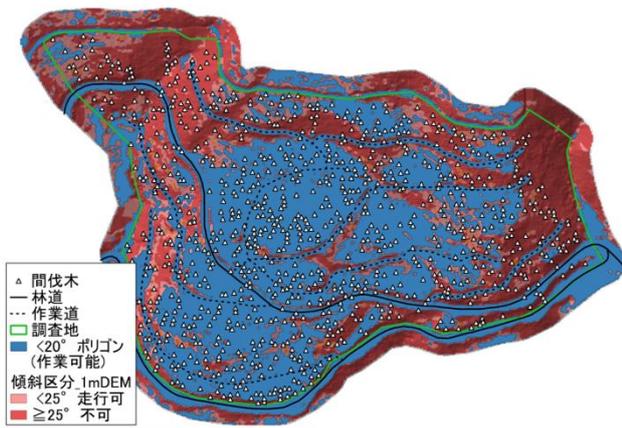


図 5-5 傾斜角 20° 以下青色ポリゴン化(消去後)

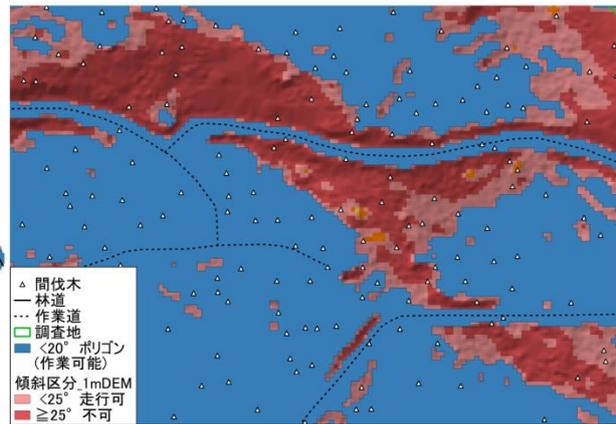


図 5-6 拡大図(消去後)

そこで、本研究では森林作業道の指針で幅員が 3m とされていることから、車体サイズを考慮し面積が 9 m^2 以下の飛び地での作業を不可能としました。QGIS にて面積が 9 m^2 以下のポリゴンを目視にて消去する作業を調査地全体に行うことで、調査地内の青色で表示されている全ての場所で高性能林業機械が作業可能となりました(図 5-5)。

加えて、分類基準として考慮しなければならないことがあります。それは以下のような場合です(図 5-7)。黄色の四角で囲んでいるような比較的広い場所は作業可能エリアですが、走行不可の地形に囲まれており、高性能林業機械で進入することが表示的には困難です。しかし、青色点線で囲んでいるような場所は路網作設時にできた法面による急傾斜であり、走行不可の地形の幅が狭いことが分かります。このような法面は事業者への聞き取りから時間と費用をかけずに容易に進入路を作れることが確認できました。よって、本研究では法面の走行を可能とし、 9 m^2 以上の飛び地であれば高性能林業機械が進入できることとしました。

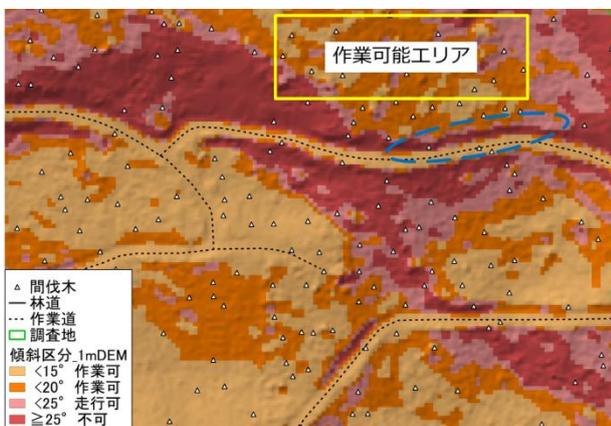


図 5-7 進入困難な作業可能エリアの例

さらに、分類基準として高性能林業機械のアームのリーチを考慮しなければなりません。事業者への聞き取りから、ベースマシンである建設機械のカタログに記載されている最大半径の値マイナス 2~3m が伐倒における最大半径であることが分かりました。本研究では 0.45 m^2 サイズの標準アームを例として、伐倒における最大半径を 4m としました。しかし、近年は林業用のロングアーム等も開発されているため、本分類方法のこの値については可変式とします。伐倒における最大半径を 4m とし、図 4-8 の青色ポリゴンに対して 4m のバッファリングを行いました(図 5-8)。つまり、水色のバッファよりも内側に存在する立木は、高性能林業機械による伐倒が可能ということになります。実際に、水色のバッファを境界にし、対象木を 2 種類に分類しました(図 5-9)。機械伐倒可能木が○、機械伐倒不可木を×として表示しました。

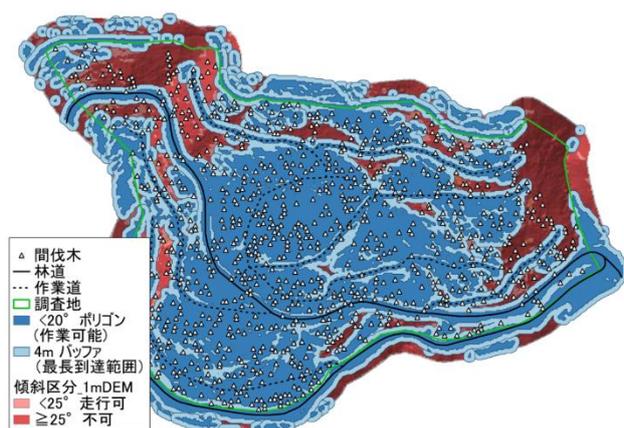


図 5-8 伐倒可否の分類前の画像

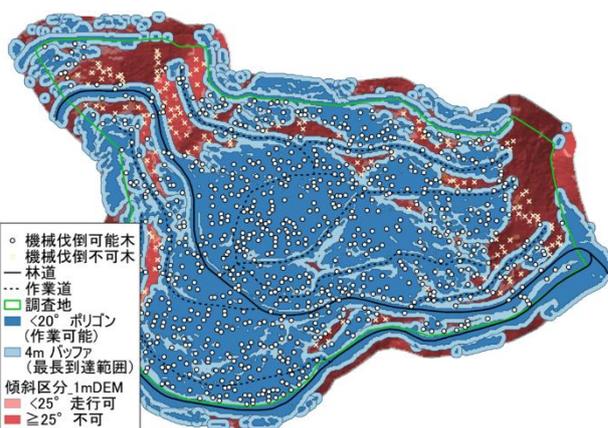


図 5-9 伐倒可否の分類後の画像

(3) 分類結果-B3

ここまで作業限界傾斜 20° として行ってきた分類を、表 3-1 で示している全ての作業限界傾斜毎に同様の方法で行いました。対象木 971 本に対する作業限界傾斜毎の分類結果は以下の通りです(表 5-1)。表中の伐倒可能率は以下の式で定義しました(式 5-1)。図 5-9 で視覚化している作業限界傾斜 20° の場合については、伐倒可能木 834 本、伐倒不可木 137 本、伐倒可能率 85.9%という結果になりました。

表 5-1 作業限界傾斜毎の分類結果

作業限界[°]	伐倒可能[本]	伐倒不可[本]	伐倒可能率[%]
15	697	274	71.8
20	834	137	85.9
25	925	46	95.3
30	965	6	99.4
35	971	0	100.0

$$\text{伐倒可能率}[\%] = \frac{\text{伐倒可能木}[\text{本}]}{\text{対象木}[\text{本}]} \times 100$$

式 5-1 伐倒可能率の式

おわりに-B4

分類結果より、評価と考察を行いました。ここでは、林業事業者にご協力いただき分類結果について討論を行い、客観性の向上に努めました。作業限界傾斜 15° では伐倒可能率が 71.8%とやや低い値であることが分かります。ここで林内走行型を想定した場合、伐倒不可木と分類された 274 本に対してチェーンソーでの伐倒、もしくは伐倒を行わないという選択を行う必要があります。どちらを選択しても、施業内容に大きな影響を与えることが予想されます。作業限界傾斜 20° では、伐倒可能率が 85.9%と比較的高い値です。調査地の平均傾斜が 20° であることから、施業地の平均傾斜と高性能林業機械の作業限界傾斜が同程度である場合、施業地の大部分が高性能林業機械の伐倒可能域であることが窺えます。この場合も伐倒不可木と分類された 137 本に対して同様に上記の 2 つの選択を行う必要がありますが、施業内容に与える影響は小さいことが予想されます。なぜなら、高性能林業機械の伐倒可能域に限定し林内走行型の施業を行った場合、路網活用型と比較して生産性と林業従事者の安全性の向上が期待できるからです。これらが施業内容に与えるプラスの影響を考慮すると、伐倒可能率の不足分を十分に補うことができると考えられます。作業限界傾斜 25-35° では、伐倒可能率が 95%以上と申し分のない値ですが、当然のことながらこれらの作業限界傾斜に対応可能な高性能林業機械とオペレータが必要となります。これらのことから本分類方法

の核となる作業限界傾斜の決定について考察をしました。作業限界傾斜は、実際の現場では作業工程の計画の際に用いられるべき値ですが、その値は3.(2)で記した通り、林業機械メーカーが決定し保証するものではなく、諸条件によって異なります。そのため、作業限界傾斜の決定については高性能林業機械の転倒等のリスクからオペレータの安全を第一に考え、可能な限り小さく無理のない値にするべきです。その上で、分類結果の伐倒可能率から生産性を予想し、良好な値であれば林内走行型の施業を検討することができるのではないかと考えられます。本研究の調査地においては、作業限界傾斜の理想的な値は20°であったと考えられ、諸条件が揃っていれば十分に林内走行型の施業が実施できた可能性があります。

分類結果及び調査地における間伐作業日報データから、路網活用型と林内走行型の双方のコストを推定し比較を行いました。間伐における伐倒・造材作業のみのコスト推定となりましたが、伐倒・造材作業のコストは林内走行型が路網活用型の半分以下となり、その優位性が明らかとなりました。推定値を基にした比較であるため精度についてはあまり言及できませんが、現状の半分以下のコストで間伐を行えるという推定結果は、林内走行型の導入及び普及を検討する判断材料として十分に評価できます。また、本研究は伐倒機械を対象とした高性能林業機械使用基準マッピングですが、集材機械を対象にした基準も定義することで、林内走行型の全工程のコストを推定することができます。現状のクローラ式集材機械では集材可能域が多く存在しないことが予想されますが、先進国と同様のホイール式集材機械の開発、普及が進めば集材可能域が拡大し、林内走行型の全工程通してのコスト低減に期待できます。

研究全体のまとめとして、高性能林業機械使用基準の視覚化及び伐倒可否の分類を行うことで、現地踏査の労力を省力化することや作業工程の計画を補助することが可能となりました。さらに、分類結果を用いて作業工程の機械化による費用対効果を事前把握することで、各事業体は高性能林業機械及び林内走行型の導入を検討できると考えられます。これらの成果は、比較的傾斜が緩い本研究の調査地のみならず、いずれの傾斜地への適用も期待できます。また、高性能林業機械やケーブルアシストシステム等の技術開発で作業限界傾斜が向上するといった条件の修正や追加が容易なため、今後変化し得る条件に合わせた高性能林業機械使用基準の視覚化及び伐倒可否の分類を行うことが可能です。

引用・参考文献

- ・岩岡正博ら，(2016)，“平成 27 年度森林利用学会シンポジウムの報告 伐出システムと路網の活用：北海道の挑戦”，機械化林業(749)，9-15
- ・小林洋司，(2015)，“次世代高能率林業機械と路網整備”，機械化林業(734)，7-13
- ・佐々木尚三ら，(2013)，“ハーベスタによる林内走行型作業システムの適用条件”，日本森林学会大会発表データベース(124)，780
- ・佐々木尚三，(2016)，“わが国の CTL システムの現状(〈特集〉路網を活用した伐出システム)”，森林利用学会誌(31)，5-11
- ・松本システムエンジニアリング株式会社，(2021)，“ラジコン式伐倒作業車(3)～無人で伐倒・搬出作業を行う技術の開発～”，機械化林業(812)，24-28
- ・Mikael Lundbäck，(2021)，“Global analysis of the slope of forest land(G.S.F 2021)”，Forestry: An International Journal of Forest Research(94)，54-69
- ・林野庁，(2020)，“令和 2 年版 森林・林業白書”，一般社団法人 全国林業改良普及協会
- ・林野庁，(2021)，“路網を活かした森林作業システム～森林作業システム構築の基本～”，一般社団法人 フォレスト・サーベイ