

頑健で作業効率の高い合理的な森林作業道の路網配置の明確化

東京農工大学
連合農学研究科
環境資源共生科学専攻
森林利用システム学研究室

猪俣 雄太

「頑健で作業効率の高い合理的な森林作業道の路網配置の明確化」

1 章 序論	1
1.1 背景.....	1
1.2 作業道の変遷と既往の研究.....	5
1.3 本研究の目的と構成.....	7
2 章 平均搬出距離算出のための理論式の導出と高密路網モデルの構築.....	10
2.1 はじめに	10
2.2 平均搬出距離の算出理論式の導出	11
2.3 路網モデルの構築とそのモデルの利用可能性	17
2.3.1 路網モデルの検討	17
2.3.2 路網モデルの平均搬出距離算出式の構築	19
2.3.3 路網モデルの利用可能性の評価.....	20
2.4 まとめ	22
3 章 平均搬出距離が短くなる配置形状.....	24
3.1 はじめに	24
3.2 分析に用いるパラメータと分析方法.....	24
3.3 はしご型モデルを構成する各配置パラメータが平均搬出距離に与える影響結果....	25
3.3.1 幹線の位置を決定する変数 v の影響	25
3.3.2 幹線本数の影響.....	27
3.3.3 支線間隔の影響.....	29
3.4 配置形状が平均搬出距離に与える影響	31
3.5 まとめ	33
4 章 配置形状が木材搬出経費に与える影響.....	34
4.1 はじめに	34
4.2 想定するシステムと経費の算出方法.....	34
4.2.1 想定するシステムと路網モデル.....	34
4.2.2 木材搬出に関わる経費の算出	36
4.3 結果.....	41

4.3.1	各立木サイズで木材搬出経費が最も安い作業システム	41
4.3.2	配置形状と搬出経費との関係	42
4.4	路網開設・維持費が経費に与える影響	43
4.5	まとめ	45
5章	開設地の選定条件の明確化に対するラフ集合理論の適用可能性	47
5.1	はじめに	47
5.2	対象地の概要	47
5.3	ラフ集合理論の概要	53
5.3.1	ラフ集合理論の概念	53
5.3.2	条件部に関する属性の決定	56
5.3.3	結論部に関する属性の決定	68
5.3.4	しきい値の決定	70
5.3.5	評価方法	72
5.4	適用可能性の評価結果	73
5.4.1	ラフ集合理論から抽出した地形条件	73
5.4.2	属性数と判別割合との関係	73
5.5	考察	78
5.5.1	カテゴリー数がラフ集合理論で得られる結果に与える影響	78
5.5.2	しきい値がラフ集合理論で得られる結果に与える影響	81
5.6	まとめ	83
6章	開設地の選定条件となる地形的特徴の抽出	84
6.1	はじめに	84
6.2	評価方法	84
6.2.1	重要度	84
6.2.2	コラムスコア法	85
6.2.3	組合せ表	88
6.3	解析結果	90
6.3.1	地形属性に関する地形的特徴	90
6.3.2	地形カテゴリーに関する地形的特徴	92

6.3.3 地形カテゴリーの組合せに関する地形的特徴	101
6.4 共通性の高い条件と経験的知識との比較	106
6.5 まとめ	107
7章 選定条件の適用可能性.....	109
7.1 はじめに	109
7.2 評価方法	109
7.2.1 選択性の評価方法	109
7.2.2 汎用性の評価方法	110
7.3 分析結果	112
7.3.1 選択性の評価	112
7.3.2 汎用性の評価	114
7.4 開設適地の条件と抽出率との関係	117
7.5 おわりに	120
8章 総括	122
謝辞.....	124
引用文献	125

1章 序論

1.1 背景

平成 23 年の森林・林業基本計画（林野庁 2011）では、効率的で安定的な林業経営による持続可能な林業を推進することが閣議決定され、これを達成するためには施業の集約化や路網整備と林業機械の導入による採算性の向上が必要であるとしている。その中で、路網整備はこれまで一般車両の通行が可能な車道である林道と、一般車両の通行は想定しない一時的に利用する作業道、通常林業用の機械のみが走行可能で、一時的に利用する作業路ごとに国や地方公共団体から補助が行われてきた。しかし、近年では作業道や作業路の作設技術の向上によって、簡易で耐久性のある作業道や作業路が整備され、そのような道路を長期間利用することで、作業効率の高い木材生産を行う事業者が現われてきた。そこで、林野庁はそのような道路の工法や手法を取りまとめ、それらの整備を進めるために、「作業路作設の手引き（林野庁 1999）」を作成し、これを受けて各都道府県は「作業道開設基準」を作成した。しかし、作成した名称は、林野庁では作業路としているのに対し、各都道府県では作業道としており、簡易で耐久性のある道路に対するそれぞれの認識は異なっている。これは作業道と作業路は上述した基準で区分されてはいるものの、実際には地域や事業者、路網整備を行う関係者間でこれらの路網に対するイメージが異なっているためである（林野庁 2010a）。

そこで、各関係者の認識を共通化させ、効率的な作業システムの構築に向けた路網整備を加速するために、森林・林業再生プラン推進本部の路網・作業システム検討委員会では、従来、区分されていた林業に利用する路網を林道、森林作業道、林業専用道の 3 種類に新たに区分しなおした。まず、路網を「車道」と、主として林業用の機械が継続的に走行する「森林作業道」に区分し、さらに「車道」を一般の車両の走行を予定して開設する「林道」と森林施業専用の車両（10t トラック等）の走行を予定して開設する「林業専用道」とした（林野庁 2010a）。また、路網・作業システム検討委員会では、新たに作成した林業専用道と森林作業道の整備促進のために、それぞれ「林業専用道作設指針」、「森林作業道作設指針」を制定し、さらに 3 種類の路網密度の目安と作業システムの一例を地形傾斜別に示している（表-1.1、表-1.2）。

林野庁（2010 b）によると、平成 19 年度末の林道総延長は 13.1 万 km、当時の区分による作業道総延長は 9.8 万 km であり、公道等を含めた林道密度は 12.9 m/ha、作業道密度は 3.9 m/ha である。したがって、平成 19 年度末での林道密度は表-1.1 に示した値に近づいている。一方で、平成 19 年度末で示されている作業道が路網・作業システム検討委員会で新たに区分した林業専用道と森林作業道のどれに該当するかは分からないが、いずれの場合でも密度は表-1.1 の目安には到達していない。このこ

とから、林道密度は表-1.1 に示した目安に近づいているものの、林業専用道や森林作業道は目安に到達していないことから、今後は全国的には林道整備の規模は縮小し、林業専用道や森林作業道の整備が拡大する状況にある。その中で、森林作業道は他の道路よりも林内に高密に作設される上に、林業作業の根幹となる路網であることから、特に整備を進める必要がある。森林作業道の整備を進めるには、森林作業道の作設計画(図-1.1)を立てることが必要となるが、その森林作業道の作設計画の流れは、まず作業システムを決定し、次に使用する機械に適した路網密度や幅員等の規格を設定する。その後、地形図から、開設できる場所を選定し、路網配置を検討する。最後に、現地踏査によって路線を決定し、路網を作設する。

まず、最初の作業システムの決定では、林業の経営方針や施業技術、所有している林業機械、現場の地形条件や林況から適した林業機械を決定する必要がある。これまで、地形傾斜や年間生産量、集材形態(全木や短幹)、林況などから各現場に適する作業システムおよび林業機械が提案(林野庁 2010a, 全国林業改良普及協会 2001)されており、これらを用いることで作業システムを決定できるようになっている。

次に路網密度や幅員等の規格の設定では、使用する機械や地形条件から路網の規格を決定する必要がある。路網密度は表-1.1 で示した路網密度と決定した作業システムから目安が判断でき、路網密度以外の森林作業道の規格は、森林作業道作設指針に目安が記されている。森林作業道作設指針は森林作業道を作設する上で考慮すべき最低限の事項の目安が記されており、例えば傾斜に応じた幅員の規模や縦断勾配や盛土や切土の法面勾配の目安が示されている。したがって、これらが、各現場に対応した森林作業道の規格の参考になる。

路網配置の検討では、まず地図上で配置を考え、次に現地踏査によって路線選定を行うが、そのためにはどのような配置形状で、どこに開設するかを考える必要がある。森林作業道は長期間利用できる林業用の道であり、林道より低規格な道路であることから、そのような道路に対して道路が崩壊せずに、かつ低コストで開設、維持できることが求められている。そのため、森林作業道はそのような条件を満たす場所に開設する必要がある。森林作業道の開設場所や路網配置に関して、森林作業道作設指針では、開設場所は地形・地質の安定している地点とし、路網配置は作業が安全に行えて、かつ伐木造材や集材等の作業に使用する機械の種類、性能、組合せに適合し、森林内での作業の効率性が最大になるような配置と定めているが、具体的にどのような配置形状でどこに開設すべきかは明記されていない。このことについて、森林作業道作設指針では全国一律に適用する具体的な指針を策定することは、地域における創意工夫を促す面で、必ずしも望ましくないことと、簡易で耐久性のある路網を科学的な根拠を持つ

でデータ化し、全国に適用させることは、現状では難しいためであると述べており、どのような配置でどこに開設するかは作設技術者に任せている。そのため、技術者の技能によって、森林作業道の配置や開設場所は大きく変わり、場合によっては開設場所の選定ミス等による森林作業道の崩壊（林野庁 2010）が生じている。したがって、作業効率が高く、耐久性のある森林作業道を配置するには、適切な配置で、適切な場所に開設できる高い技能を持った技術者が必要となるが、このような技能を得るには、長年の経験と勘を要する。

このような背景から、森林作業道は今後も開設される状況にあるものの、路網配置の検討段階において、どのような配置形状で、それをどこに開設すべきかが具体的に明らかになっていないため、路網配置の設定と開設場所の選定は経験的知識から培われた高い技能を持った熟練作設技術者以外には、森林作業道の配置計画は困難になっている。高い技能を持った熟練作設技術者になるには、長年の経験から培った経験的知識が必要となるが、このような技能は感覚的で曖昧な表現で伝わっているため、経験の浅い技術者には習得が難しい。しかし、今後路網と林業機械を組み合わせたシステムを推進させるには、作設経験の浅い技術者でも安全で崩壊せず、また作業効率の高い森林作業道の作設計画ができる指針づくりが必要になる。

表一.1.1 地形傾斜に対応する路網整備水準の目安

（林野庁 2010a）一部修正

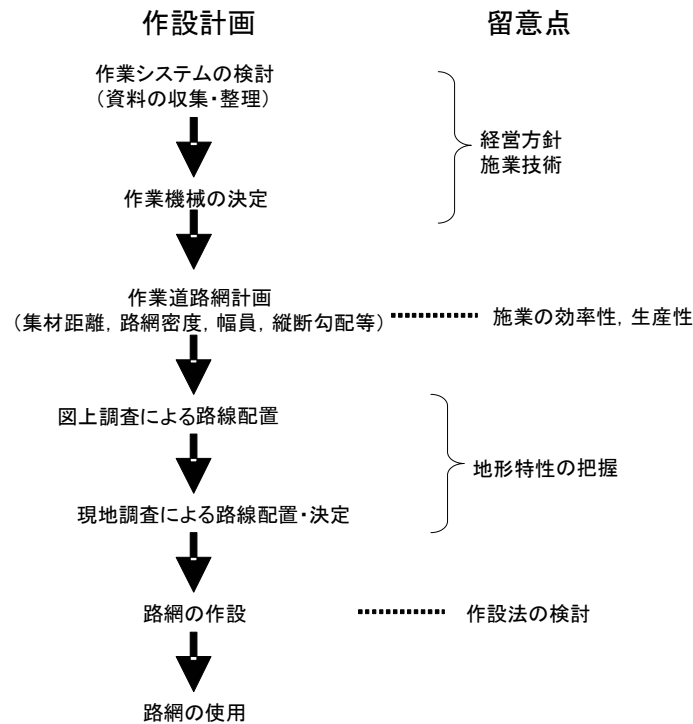
単位（m/ha）

区分	作業システム	基幹路網			細部路網	路網密度
		林道	林業専用道	小計	森林作業道	
緩傾斜地 (0~15°)	車両系	15~20	20~30	35~50	65~200	100~250
中傾斜地 (15~30°)	車両系	15~20	10~20	25~40	50~160	75~200
	架線系				0~35	25~75
急傾斜地 (30~35°)	車両系	15~20	0~5	15~25	45~125	60~150
	架線系				0~25	15~50
急峻地 (35° ~)	架線系	5~15	-	5~15	-	5~15

表－1.2 地形傾斜に対応する作業システムの一例

(林野庁 2010a) 一部修正

区分	作業システム	最大到達距離(m)		伐採	作業システムの例		
		基幹路網から	細部路網から		木寄せ・集材	枝払い・玉切り	運搬
緩傾斜地 (0～15°)	車両系	150～200	30～75	ハーベスタ	グラップル	プロセッサ	フォワーダ トラック
中傾斜地 (15～30°)	車両系 架線系	200～300	40～100 100～300	ハーベスタ チェーンソー	グラップルウィンチ スイングヤーダ	プロセッサ	フォワーダ トラック
急傾斜地 (30～35°)	車両系 架線系	300～500	50～125 150～500	チェーンソー	グラップルウィンチ スイングヤーダ タワーヤーダ	プロセッサ	フォワーダ トラック
急峻地 (35°～)	架線系	500～1500	500～1500	チェーンソー	タワーヤーダ	プロセッサ	トラック



図－1.1 森林作業道の配置計画の流れと留意点

(森林保全管理技術研究会 2011, 一部修正, 加筆)

1.2 作業道の変遷と既往の研究

林業専用道や森林作業道の前身である作業道は、森林・林業百科事典（日本林業技術協会 1999）によると集材作業など主として林業生産に供することを目的として作設され、トラックなど一般車両が通行する道で、林道以外の道と定義されている。しかし、作業道の利用頻度は時代によって異なり、1970年代までは作業道は森林施業における集運材、造材等の一工程として臨時的に設けられるものとしており、一時的に使用される道であった（酒井 2004）。そのため、林道と比べると、容易に作設でき、構造物も少ない。当時の作業道と林道の CBR 値を比較した結果（小林ら 1975, 1978）では、林道は 48% であるのに対し、作業道は 20% 以下となり、作業道の支持力が低いことが示されている。1970 年から統計し始めた国庫補助で開設された作業道量によると、1973 年のオイルショックを契機に開設単価が高騰した林道と入れ替わるように、作業道の開設量は増えており、それ以降、林道の前段階として、作業道は作設され、作業道の開設量は加速している（酒井 2004）。これについて、岩川による林業に対する作業道の評価（1986, 1987）によると、これまでの一次的な利用であった作業道が長期的な利用の道として、作設され、新たに作設された作業道は林道の代替機能として、働いていることが示されている。また、酒井による全国の作業道の実態の調査（1986, 1987）では、作業道が多く開設されている地域の特徴として、林道密度が高い地域や車両系機械が多い地域であることを明らかにしている。このように、オイルショック以降の作業道には、一次的な施設としての作業道と長期的な施設としての作業道の 2 種類があり、路網において、主に一時的な施設である作業道は支線として利用され、長期的な施設である作業道は幹線として利用されていた。そこで、両者を分類するために、林内作業道車による作業を随時行う上で必要となる長期間継続的な使用に供する作業道であり、林道の機能を補完する施設として、あるいは林道の先行的な機能を代替するものとして、先行的に整備させる作業道と定義される基幹作業道が新たに 1987 年に設定され、長期的な施設である作業道を基幹作業道、一時的な施設である作業道を作業道と区分した（酒井 2004）。その後、現場の作業道作設技術者の長年の試みから、長期間利用できる作業道作設の経験的知識が各地で発展していき、容易に作設でき、育林から間伐、森林作業全般にわたって、長期間利用でき、崩壊しない作業道、いわゆる森林作業道が各地で開設され始めた。そのような経験的知識によって作設された森林作業道とそれ以前に作設された作業道との支持力を比較した結果ではこれまでの一時的な作業道よりも高く、林業生産活動に対し、有効な作業道であることが明らかになっている（小林ら 2005）。そのような長年の経験から得た崩壊しにくい作業道のルート選定の方法や作業道作設の手法、路網配置計画の考え方に関する指導書（大橋ら 1989, 岩川 1993, 大橋ら 2007, 田邊 2007）が発刊され、また長期間利用する森林作業道を林野庁が普及・促進したこと

によって、長期間利用できる森林作業道が全国に普及・定着し始めた。このように作業道の利用頻度は一時的な施設から、長期的な施設と変遷していき、林道の代替機能を有するようになった。さらに作設経験に伴って、簡易に作設でき、長期間の利用でも崩壊しない作業道（森林作業道）が作設されるようになった。近年、林野庁は車両系機械と森林作業道とを組み合わせたシステムの普及、推進を行っており、森林作業道の必要性は高まっている。今後、森林作業道と車両系機械を組み合わせたシステムを推進させるには、崩壊しない森林作業道を作設経験の浅い技術者でも作設可能にする必要があるが、そのためには、最適な森林作業道の施工方法や開設場所、配置方法を明らかにする必要がある。そこで、これまでこの経験的知識を用いて作設された森林作業道の施工技術や開設場所の選定技術、配置手法を明確化する研究が行われている。施工に関しては、主に路面支持力や排水施設、木造構造物に関する研究が行われており、路面支持力に関しては、作設方法と路面支持力および路体強度との関係（小林ら 2005）や斜面傾斜と土の締固め特性との関係（梅田ら 2007）、斜面傾斜と路面支持力との関係（與儀ら 2010）の研究が行われ、これらの研究から木造構造物を施工した作業道の方が路面支持力や路体強度が高くなることや、急傾斜地の方が締固めると密度が高くなること、さらに斜面傾斜の増大に伴いその路面支持力は増加することが明らかになっている。また、作設経過年数と路面および路体支持力との関係（澤口ら 2011）では、路面支持力は10年経過しても増大し、路体支持力は2年程度では施工時と変化しないことが示されている。排水施設に関しては、片勾配による排水および侵食防止効果の研究（矢部ら 2010）が行われ、縦断勾配15%までの作業道では、分散排水効果と侵食防止効果を得る片勾配は5%程度であることを示している。また、多く指導書にも載せられている木製構造物については、それによる路面の補強効果の検討（山崎ら 2003、井上ら 2003）や木製構造物の強度と作設経過年数との関係の研究（武井ら 2010）が行われ、これらの結果から補強効果の力学的メカニズムの解明や控え材の補強効果が得られる木材の長さ、木造構造物の耐用年数は10年以上あることを明らかにしている。

一方、開設場所に関しては、鈴木ら（2007）はラプラス関数を用いて作業道の開設地として凸地形が選択されていることを明らかにしており、また梅田ら（2007）は対象地全体と比較して、緩傾斜地が選択されていることを明らかにしている。

また、路網配置に関して、熟練した作業道開設技術者である大橋（2001）や田邊ら（2007）は到達のための道として斜面方向に急な勾配の路網を稜線部に配置し、その他の部分に作業のための道として勾配の小さい路網を等高線に沿って配置した幹線魚骨型で、さらにその一部に循環路網を形成している路網が最適であることを述べている。また、この熟練した技術者が配置した路網形は魚骨型路網であることを、吉村ら（1993）はAHP手法を用いて示している。さらに、作業道網の形状修正係数の評価（神

崎ら 1990) によって、そのような路網の形状修正係数は 1.42 であり、幾何学的配置において、理想的な配置に近いことを示している。

このように最適な施工方法や開設場所、路網配置の検討が行われ、これらの研究成果に基づいて、施工方法は整理され、傾斜に応じた幅員や縦断勾配や切土や盛土の施工方法、排水方法が森林作業道作設指針に具体的な方法で示されるようになった。しかし、具体的な開設場所はいまだに示されておらず、また路網配置に関しては、魚骨型路網が最適であることが示されているものの、どのような形状の魚骨型が最適であるかは明らかになっていない。

1.3 本研究の目的と構成

今後、森林作業道と林業機械を組み合わせたシステムを推進させるには、作設経験の浅い技術者でも安全で崩壊せず、また作業効率の高い森林作業道の作設計画ができる指針づくりが必要になる。これまでの研究から、施工方法は整理され、その目安が森林作業道作設指針に記載されているため、これを参考にできる。しかし、路網の配置に関しては、長年の経験がいまだに必要とされ、作業効率の高い配置形状はどのようなものか、そしてその配置形状において、崩壊しない安全な地形はどこで、崩壊の危険性のある地形がどこかは明らかになっていない。酒井 (2004) によると、特に傾斜が 20 度以上になると切土量が増加し、切取りのり面高が高くなるため、そのような地域での森林作業道の作設は難しいことが指摘されている。

そこで、本研究では作設が困難であるとされる傾斜 20 度以上の地域において、長年の経験が必要であった森林作業道の配置計画を作設経験の浅い技術者でもできるように、経験がいまだに必要とされる作業効率の高い配置形状を明らかにすることと、その配置形状において、崩壊しない最適な開設場所を明らかにすることを目的とする。路網配置によって作業効率が大きく変わる工程は集材工程である。高密度な森林作業道が作設される以前は、架線機械による集材が中心であったため、作業効率の高い路網配置は集材の作業効率が高くなる配置、すなわちできる限り路網を均一に配置することであった (上飯坂ら 1971)。しかし、近年はハーベスタ・フォワーダシステムといった車両系システムの普及に伴って、集材工程は伐倒木を林内から道端まで木寄せする作業と木寄せで集まった伐倒木を土場まで搬出する作業との 2 つに分類できる。このようなシステムでの作業効率の高い路網配置は木寄せ作業では路網を均一に配置することであり、搬出作業では土場まで移動する平均距離 (平均搬出距離) を短くすることになる。これまで路網配置係数 f_0 (堀ら 1971) によって、対象路網がどの程度、均一に配置されているかは評価できるため、その指標を用いることで、木寄せ作業の作業効率と路網配置との関係を明らか

にでき、作業効率の高い路網配置形が明らかになっている（井上 1989）。一方で、平均搬出距離はこれまで循環や分岐を数学的に表現できなかったことから、平均搬出距離を理論的に算出できていない。そのため、平均搬出距離の長さに対する評価はできていない。

そこで、まず第二章では作業効率の高い配置形状を明らかにするのに必要な循環や分岐のある路網の平均搬出距離の算出理論式の導出を行う。そのために、平均集材距離の算出理論式と同様に搬出距離の分布関数とグラフ理論を用いて、平均搬出距離の算出理論式を導出する。さらに、配置形状と平均搬出距離との関係进行分析するために、作業効率の高い魚骨型路網である路網が均一に配置された路網モデルを提示し、導出した理論式を用いて、モデルの有効性について評価する。

第三章では第二章で提示した路網モデルを用いて、平均搬出距離が短くなる配置形状を明らかにする。そのために、第三章ではその路網モデルを構成する配置パラメータ（幹線長、幹線本数、支線長、支線間隔と起点となる幹線の位置）と平均搬出距離との関係から、配置形状が平均搬出距離に与える影響を明らかにし、ここから、平均搬出距離が短くなる配置形状を明らかにする。

第四章では、第二章で提示したモデルを用いて、木材搬出経費に与える路網配置の影響を明らかにする。第三章によって、平均搬出距離と配置形状との関係が明らかとなったが、配置形状が木材搬出経費に与える影響は明らかになっていない。そこで、第三章で得られた配置形状と平均搬出距離との関係から、路網配置と車両系システムの木材搬出経費との関係を明らかにする。

第二～四章で作業効率の高い配置形状を明らかにする。しかし、崩壊しない森林作業道を経験の浅い技術者でも容易に設計するには、配置形状だけでなく、その配置において、安全に森林作業道が開設できる地形を選択し、開設できない地形を避ける必要がある。これまでに発刊されている指導書（大橋ら 1989, 大橋ら 2007, 田邊ら 2007）によると、最適な開設場所の選定は様々な地形量から行っているとされるが、曖昧な部分が多く、誰でも容易にできるものではない。そのため、経験的知識から適切な開設地を明確にするには、複数の地形要素を分類・整理して選定に用いる条件を抽出できる手法が必要であると考えられる。そのような手法の1つとして、様々な因子を用いることで、観測結果に内在する経験的知識を明確な条件として抽出するラフ集合理論がある。

そこで、第五章では開設場所の選定条件を明確にするのにあたり、ラフ集合理論は適用できるかを評価する。そのために経験的知識によって森林作業道を開設した 12 森林作業道を対象に、平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、斜面下部の傾斜、崖錐、0 次谷、過去の崩壊の 7 種類の属性と作業道開設地の位置データをラフ集合理論に適用して、開設場所の選定条件を抽出する。この抽出した条件からどの程度経験的知識を明確化できたかを表す判別割合を算出し、その指標を用いて、適用可能性を評

価する。

第六章では第五章で得られた選定条件がどのような地形であるかを明らかにする。経験の浅い技術者でも、容易に森林作業道の計画を行うには、抽出した選定条件の地形的特徴を明らかにする必要がある。しかし、ラフ集合理論で得られた条件は膨大で、森林作業道によって異なるため、その地形的特徴の把握は難しい。そこで、抽出された数百の条件を属性値単位に分解し、高評価である属性値に高得点を与えることで、共通性の高い条件を抽出するコラムスコア法と組合せ表を用いて、熟練の技術者が共通している条件を抽出し、その得られた条件の地形的特徴を把握する。

第七章では第六章で得られた共通性の高い条件の適用可能性を明らかにする。ラフ集合理論とコラムスコア法および組合せ表で抽出した条件は、ラフ集合理論に適用した 12 森林作業道にのみ適用可能であり、他の森林作業道に適用できるかは明らかになっていない。そこで、得られた条件を他の森林作業道に適用し、そこから第六章で得られた条件の適用可能性を検討する。そのために、選択性と汎用性を指標に、得られた条件の適用可能性を評価する。

以上の検討を踏まえ、第八章では総括を行った。

2章 平均搬出距離算出のための理論式の導出と高密路網モデルの構築

2.1 はじめに

本研究の目的は、経験的知識が必要とされる作業効率の高い配置形状を明らかにすることと崩壊しない最適な開設地の選定条件の明確化を行うことである。そこで、第二章から四章では作業効率の高い配置形状を明らかにする。

まず、林業の路網には面状の広がりのある林地とのつながりを持つ機能、いわゆる横の機能と人や木材、機械などが移動する機能、いわゆる縦の機能の2種類がある（林業機械化推進研究会 1995）。横の機能の観点から、作業効率の高い配置形状を考えると、対象地に等間隔に並行に路網を配置することが理想的である（上飯坂ら 1971）。等間隔に並行に配置することで、集材できる範囲である開発域の重なりがなくなり、集材できない範囲である非開発域を減らせ、さらに急斜面で等高線に沿って、等間隔に路網を配置することで、安全な作業がやりやすいといった利点がある（上飯坂ら 1990）。一方で、縦の機能から、作業効率の高い配置形状を考えると、路網全体としての平均搬出距離が短くなる配置となる。車両系機械は道路上を移動して作業や搬出を行うため、路網全体としての平均搬出距離がより短いほうが作業効率は向上する。したがって、横の機能と縦の機能から、作業効率の高い配置形状は等間隔に並行に路網を配置すること、そしてその配置において、平均搬出距離が最も短い配置と定義できる。これまでに、路網配置係数 f_0 （堀ら 1971）や形状修正係数 V_{CORR} （Segebaden 1964）を用いることで、等間隔に並行にという理想的な配置に対して、対象とする路網の配置がどの程度近い配置であるかは評価できる。一方、路網全体としての平均搬出距離路網の長さに対する評価は、その距離を算出する式が必要となる。しかし、これまでは分岐のない1本道の路網の平均搬出距離は算出できたが（例えば、石川ら 2008）、分岐や循環がある路網の平均搬出距離を理論的に算出した例はない。そのため、作業効率の高い配置形状を明らかにするには、平均搬出距離の算出理論式を導出する必要がある。一方で、配置形状には、多様な配置型があり、それらすべての配置型を検討するには労力を要する。より効率的に分析するには、作業効率の高い配置形状を明らかにするのに必要十分で過不足なく表せる路網モデルを構築し、そのモデルを用いて分析するのが有効である。

そこで、本章では作業効率の高い配置形状を明らかにするのに必要となる循環や分岐のある平均搬出距離の算出理論式を導出し、さらに配置形状と平均搬出距離との関係を分析するために必要となる路網モデルを提示し、その路網モデルの有効性を明らかにすることを目的とする。このために、まず搬出距離の確率分布関数とグラフ理論を導入して、理論式を構築する。次に、路網モデルを提示し、現実の路網にこのモデルを当てはめた場合の平均搬出距離を導出した理論式を用いて算出して、現実の平均搬出

距離との関係から提案した路網モデルの有効性を評価する。

2.2 平均搬出距離の算出理論式の導出

まず、本研究では堀ら（1971）の林内への到達距離の算出方法と同様の考え方を用いて理論式を導出する。すなわち、路網上の任意の点と、路網の起点や土場との間を最短で移動する距離を搬出距離と定義し、路網上のすべての地点における搬出距離の平均を平均搬出距離と定義する。そのため、本研究では特定の作業の場合の平均搬出距離を算出するのではなく、路網全体としての平均搬出距離を算出することになる。

ここで、任意の地点における搬出距離を s ，その搬出距離が出現する頻度の分布関数を $g(s)$ ，最大搬出距離を S_h ，作業道延長を L とすると、平均搬出距離 S_k は (2.1) 式で求められる。

$$S_k = \frac{1}{L} \int_0^{S_h} s g(s) ds \quad (2.1)$$

ここで、 $g(s)$ について、図-2.1 に示す路網を用いて、説明する。搬出距離の出現頻度は、その搬出距離で到達できる地点の数を表していることから、図-2.1 の路網での $g(s)$ は図-2.2 となる。このことから、 $g(s)$ は路網内の分岐点や端点など（以下、頂点と呼ぶ）において増減する。したがって、この $g(s)$ を s で積分した搬出距離の累積頻度分布を $G(s)$ とすると、(2.1) 式は積分の定理および堀ら（1971）が示した解法より (2.2) 式となる。

$$S_k = \frac{1}{L} \{ [sG(s)]_0^{S_h} - \int_0^{S_h} G(s) ds \} \quad 0 \leq G(s) \leq L \quad (2.2)$$

$G(S_h)$ は作業道総延長 L であることから、(2.2) 式は (2.3) 式に整理できる。

$$S_k = S_h - \frac{1}{L} \int_0^{S_h} G(s) ds \quad (2.3)$$

したがって、 $G(s)$ を求めることによって、平均搬出距離 S_k の理論式が導出できる。

$G(s)$ を求めるために、まず起点を含む各頂点の搬出距離を短い方から並べて、起点の搬出距離を s_1 ， n 番目の頂点の搬出距離を s_n とすると、隣り合った頂点間の $g(s)$ は一定値をとる。この値を $g(s_n) = N_n$ と定義すると、搬出距離が s_n 以上 s_{n+1} 未満となる路線の出現頻度は N_{n+1} で表わせる。したがって、これを積分した $G(s)$ は、隣り合った頂点間では1次関数となり、任意の s_n と s_{n+1} との間において、 $G(s)$ は

(2.4) 式で表わせる。

$$G(s) = N_{n+1} \times s + C_{n+1} \quad [s_n, s_{n+1}] \quad (2.4)$$

ただし、 C_{n+1} : 搬出距離 s_n 以上 s_{n+1} 未満における積分定数

ここで、頂点の総数を n_t とし、(2.3) 式の積分項に (2.4) 式を代入して展開すると、(2.5) 式が得られる。

$$\begin{aligned} \int_0^{S_h} G(s) ds &= \sum_{i=1}^{n_t-1} \int_{s_i}^{s_{i+1}} (N_{i+1} \times s + C_{i+1}) ds \\ &= \sum_{i=1}^{n_t-1} \left[\frac{N_{i+1}}{2} s^2 + (C_{i+1})s \right]_{s_i}^{s_{i+1}} \\ &= \frac{N_2}{2} s_2^2 + C_2 s_2 - \left(\frac{N_2}{2} s_1^2 + C_2 s_1 \right) + \\ &\quad \frac{N_3}{2} s_3^2 + C_3 s_3 - \left(\frac{N_3}{2} s_2^2 + C_3 s_2 \right) + \dots + \\ &\quad \frac{N_{n_t-1}}{2} s_{n_t-1}^2 + C_{n_t-1} s_{n_t-1} - \left(\frac{N_{n_t-1}}{2} s_{n_t-2}^2 + C_{n_t-2} s_{n_t-2} \right) + \\ &\quad \frac{N_{n_t}}{2} s_{n_t}^2 + C_{n_t} s_{n_t} - \left(\frac{N_{n_t}}{2} s_{n_t-1}^2 + C_{n_t} s_{n_t-1} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、起点の搬出距離 s_1 は 0 であり、最遠点の搬出距離 s_{n_t} は最大搬出距離 S_h であることから、(2.5) 式は (2.6) 式に整理できる。

$$\int_0^{S_h} G(s) ds = \sum_{i=2}^{n_t-1} \left[\frac{(N_i - N_{i+1})}{2} (s_i)^2 + (C_i - C_{i+1}) s_i \right] + \frac{N_{n_t}}{2} (S_h)^2 + C_{n_t} S_h \quad (2.6)$$

また、 $G(s)$ は任意の S_n において連続であることから、次の関係が得られる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{G}(s_n) &= N_n s_n + C_n \\
&= N_{n+1} s_n + C_{n+1}
\end{aligned} \tag{2.7}$$

ここで、 $N_{n+1} - N_n$ を増減数 r_n と定義すると、 C_n と C_{n+1} との差は (2.8) 式で表わされる。

$$\begin{aligned}
C_{n+1} - C_n &= (N_{n+1} - N_n) s_n \\
&= r_n s_n
\end{aligned} \tag{2.8}$$

(2.6) 式の C_{n_i} は (2.7) 式より、 $C_{n_i} = \mathbf{G}(s_{n_i}) - N_{n_i} s_{n_i}$ と表わすことができ、これと (2.8) 式を (2.6) 式に代入すると、(2.9) 式が得られる。

$$\begin{aligned}
\int_0^{S_h} \mathbf{G}(s) ds &= \sum_{i=2}^{n_i-1} \left[\frac{(-r_i)}{2} (s_i)^2 + r_i (s_i)^2 \right] + \frac{N_{n_i}}{2} (S_h)^2 + (L - N_{n_i} S_h) S_h \\
&= \sum_{i=2}^{n_i-1} \left[\frac{r_i}{2} (s_i)^2 \right] + L S_h - \frac{N_{n_i}}{2} (S_h)^2
\end{aligned} \tag{2.9}$$

これを (2.3) 式に代入すると、平均搬出距離 S_k は (2.10) 式となる。

$$\begin{aligned}
S_k &= S_h - \frac{1}{L} \left\{ \sum_{i=2}^{n_i-1} \left[\frac{r_i}{2} (s_i)^2 \right] + L S_h - \frac{N_{n_i}}{2} (S_h)^2 \right\} \\
&= \frac{N_{n_i}}{2L} (S_h)^2 - \frac{1}{2L} \sum_{i=2}^{n_i-1} [r_i (s_i)^2]
\end{aligned} \tag{2.10}$$

ここで、 $\sum_{i=2}^{n_i-1} [r_i (s_i)^2] = \sum_{i=2}^{n_i} [r_i (s_i)^2] - r_{n_i} (S_h)^2$ なので、(2.10) 式は (2.11) 式に整理できる。

$$S_k = \frac{N_{n_i}}{2L} (S_h)^2 - \frac{1}{2L} \left\{ \sum_{i=2}^{n_i} [r_i (s_i)^2] - r_{n_i} (S_h)^2 \right\}$$

$$= \frac{(N_{n_i} + r_{n_i})}{2L} (S_h)^2 - \frac{1}{2L} \sum_{i=2}^{n_i} [r_i (s_i)^2] \quad (2.11)$$

また、 n_i は路網の最遠点であり、それより遠い地点 n_{i+1} は存在しないことから、その間の出現頻度 $N_{n_{i+1}} = 0$ となるため、 $N_{n_i} + r_{n_i} = 0$ となる。したがって、平均搬出距離 S_k の算出式は (2.12) 式で表わされる。

$$S_k = -\frac{1}{2L} \left\{ \sum_{i=2}^{n_i} [r_i (s_i)^2] \right\} \quad (2.12)$$

ここで、グラフ理論を導入し、路網内の隣り合った頂点を結ぶ路線を搬出距離が短い方から長い方へ向きをもった有向グラフとすると、路線は頂点以外では交わらないプラナーグラフとなる。頂点 n に接続している辺の数 $D(n)$ (次数) は、頂点 n に入る辺の数 $D_{in}(n)$ (入次数) とその点から出ていく辺の数 $D_{out}(n)$ (出次数) の和であること (茨木ら 2010) から、これらを用いると、増減数 r_n は (2.13) 式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} r_n &= D_{out}(n) - D_{in}(n) \\ &= D(n) - 2D_{in}(n) \end{aligned} \quad (2.13)$$

これを (2.12) 式に代入すると、平均搬出距離の理論式は (2.14) 式となる。

$$S_k = -\frac{1}{2L} \left\{ \sum_{i=2}^{n_i} [(D(n_i) - 2D_{in}(n_i))(s_i)^2] \right\} \quad (2.14)$$

ここで、循環のない路網では、すべての頂点の入次数が 1 になることから、このときの平均搬出距離の算出式は (2.15) 式となる。

$$S_k = -\frac{1}{2L} \left\{ \sum_{i=2}^{n_i} [(D(n_i) - 2)(s_i)^2] \right\} \quad (2.15)$$

一方、循環路があると、1 循環路内には入次数が 2 以上の頂点が必ず 1 つあり、それ以外の頂点の入次数が 1 になる。例えば、図-2.3 に示す路網の搬出距離の出現頻度は、頂点 A までは 1 だが、その先は右回りと左回りのルートが存在するため、頂点 B の搬出距離までは 2、さらに頂点 C と D に向かうルートに分かれるため、頂点 D の搬出距離までは 3、その先は 1 になる (図-2.4)。このときの各頂点の入次数は、頂点 A, B, C は 1, 頂点 D は 2 となる。この D は、循環路内における最遠点である。このように、端点や分岐点ではない点も頂点になる場合がある。

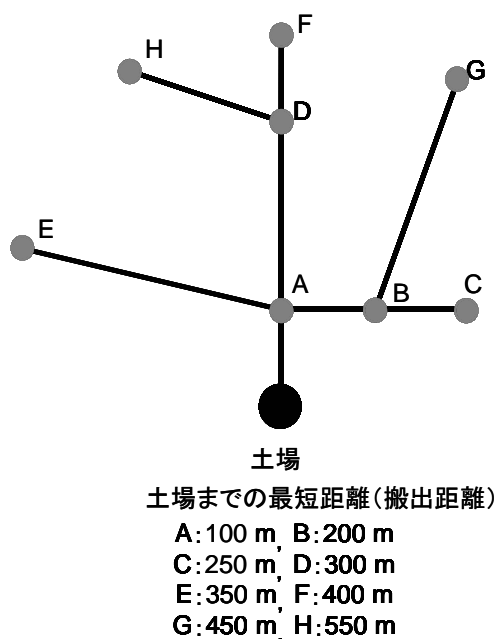


図-2.1 分岐を含む路網の概念図

図中の A~H は路網の端点や分岐点を表す

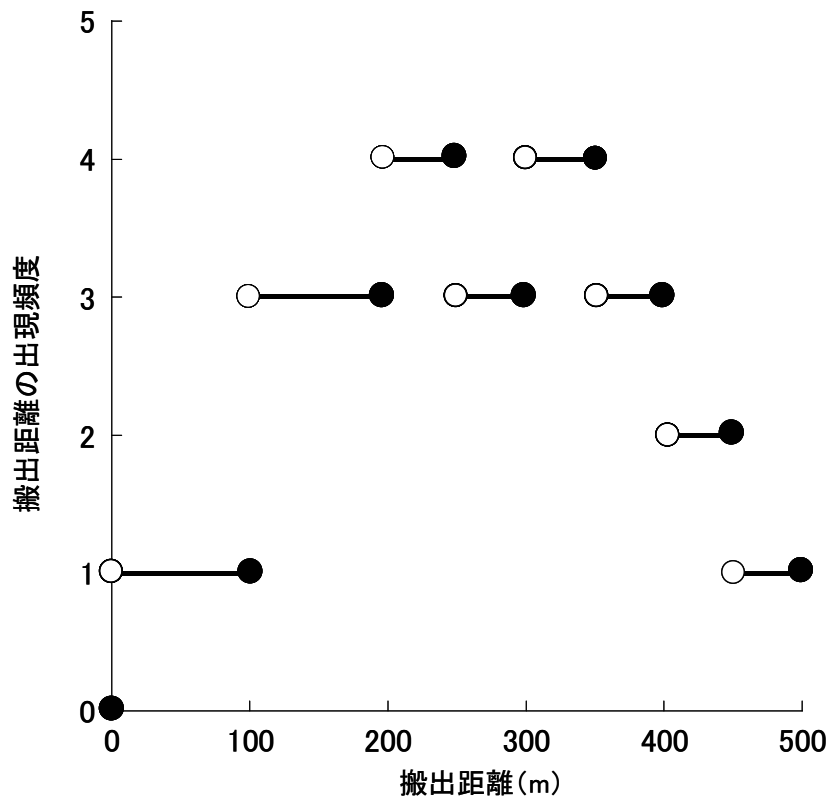


図-2.2 図-2.1 に示す路網の搬出距離の出現頻度分布関数 $g(s)$

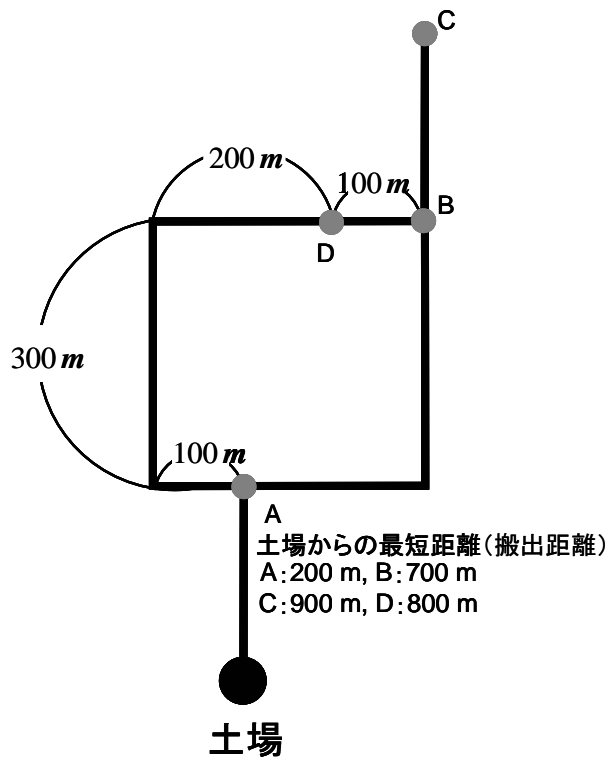


図-2.3 循環路が1つある路網

図中の A~D は頂点

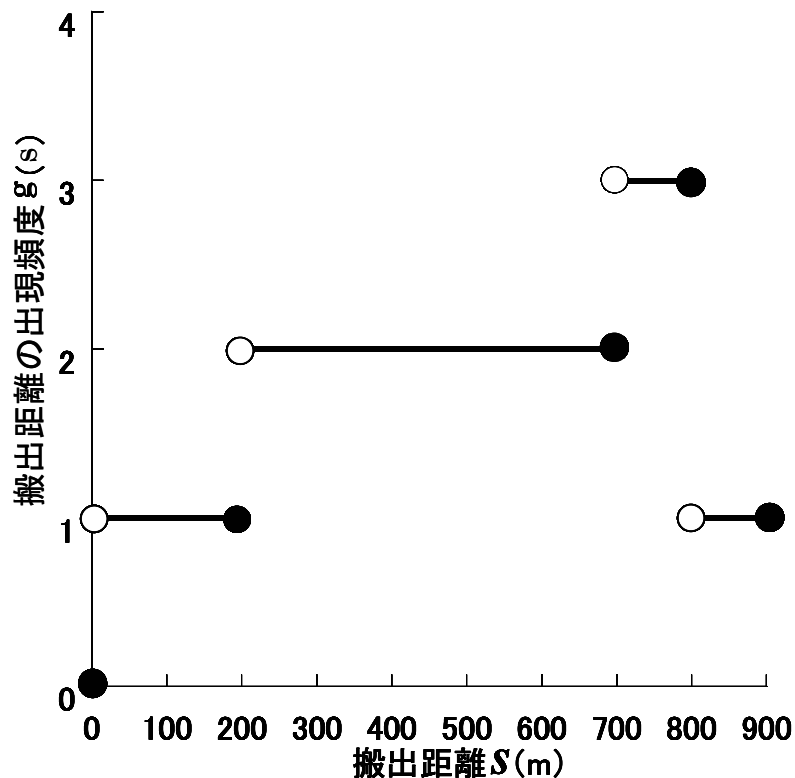


図-2.4 図-2.3 に示す路網の搬出距離の出現頻度分布関数 $g(s)$

2.3 路網モデルの構築とそのモデルの利用可能性

2.3.1 路網モデルの検討

井上（1989）は集材効率の高い路網を明らかにするために、放射型、単線型、幹線魚骨型などの6種類のモデルを構築し、それらの路網配置係数の検討を行っている。その結果、集材作業の効率が高い路網型は、傾斜によって異なり、緩傾斜地では樹枝型、幹線樹枝型、幹線魚骨型、放射複合型、単線型、放射型の順であることを示している。また、急傾斜地では幹線を有しているモデル（幹線樹枝型、幹線魚骨型）が高く、特に図-2.5 に示す幹線を斜面方向に配置し、支線を等間隔に配置した路網である幹線魚骨型の集材効率は、どの傾斜に対しても高いことを明らかにしている。この結果に加えて、熟練した技術者である大橋（2001）や田邊ら（2007）によると、安全に効率よく林業作業をするには、目的地へ到達できる道と作業を効率よく安全に行える道が必要であると述べている。そして、この要求を満たす最も有効な森林作業道網は、到達のための道として斜面方向に急な勾配の路網を稜線部に配置し、その他の部分に作業のための道として勾配の小さい路網を等高線に沿って配置した幹線魚骨型であり、

さらにその一部に交通利便性の向上および代替路の確保のために循環路網を形成している路網であることを大橋（2001）や田邊ら（2007）は述べている。また、この熟練した技術者の要求を満たす配置として魚骨型路網が最適であることを、吉村ら（1993）は AHP 手法を用いて示している。そのうえ、上飯坂ら（1990）も急傾斜地での路網配置として、幹線を最も安全な災害の起こらない場所に開設し、支線を等高線に沿って等間隔に開設するとともに、開発域の重なりを減らすために幹線と支線との交角はなるべく大きい幹線魚骨型路網を推奨している。

これまでの研究結果や経験から幹線魚骨型路網は作業効率の高い最適な配置と考えられている。到達のための幹線と作業のための支線との 2 つに機能を分け、その支線を等高線に沿って等間隔で配置し、その支線のみで作業を行うことは、路網の横の機能の観点からは理想的な配置に近い。ただし、図-2.5 で示した路網では、交通利便性の向上および代替路の確保のために循環路網は形成しておらず、また開発域の重なりもある。そこで、ここでは幹線を斜面方向に複数配置し、それに直交するように支線を等高線方向に等間隔に配置したはしご型路網モデル（図-2.6）を提示し、その路網モデルの有効性を明らかにする。なお、単純なモデルにするために、幹線の始点とそこから最も近い支線との交点までの距離と、幹線の最遠点とそこから最も近い支線との交点までの距離は、それぞれ支線間隔に等しいものとし、支線の端から最も近い幹線と支線との交点までの距離を同距離と定義する。

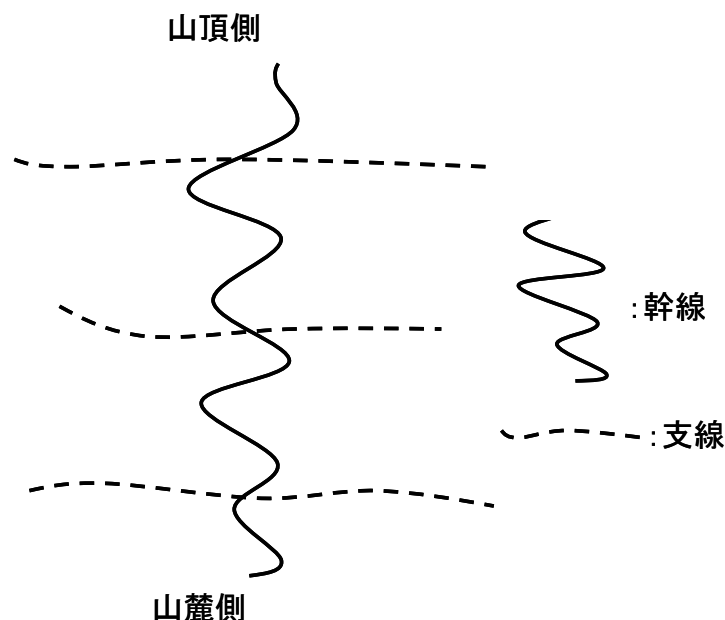


図-2.5 幹線魚骨型の概念図

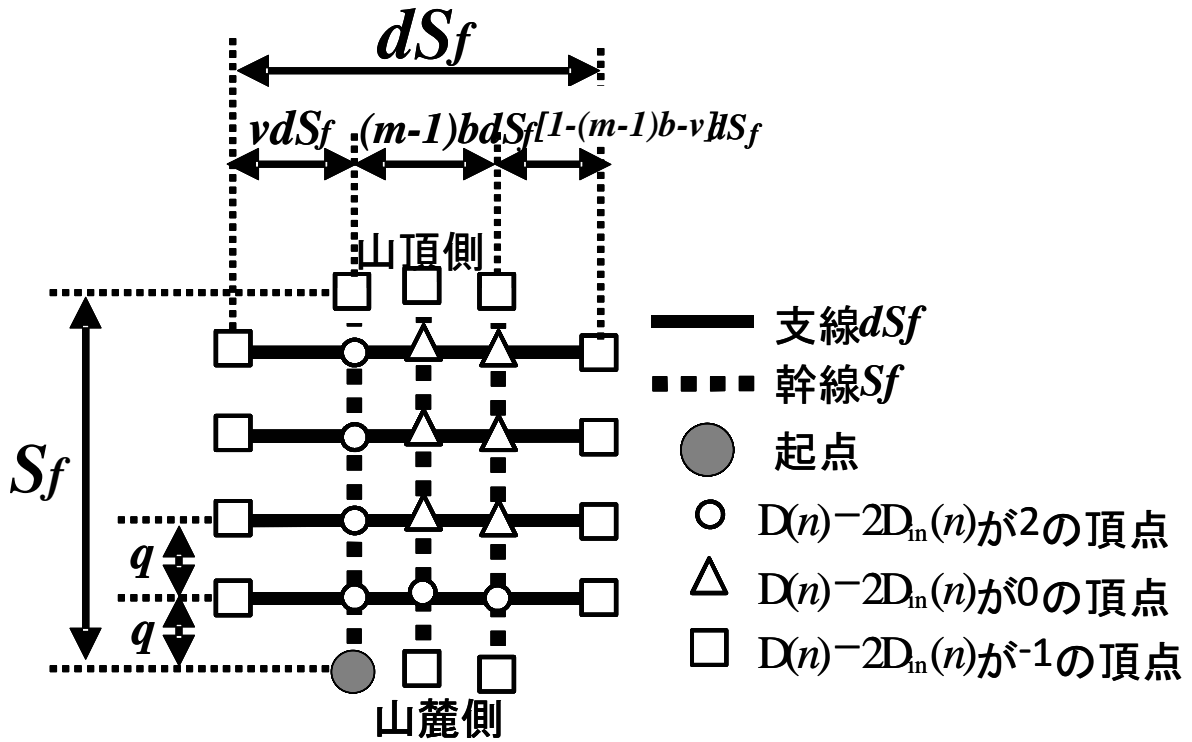


図-2.6 はしご型路網モデルの概念図と各頂点の $D(n_i) - 2D_{in}(n_i)$ の値
 図中の vdS_f , $bndS_f$, $[1-(n-1)b-v]dS_f$ はそれぞれの長さ, q は支線間隔
 d, v, b は定数を表し, $0 < v + b \leq 1$

2.3.2 路網モデルの平均搬出距離算出式の構築

はしご型路網モデルの平均搬出距離の算出式を構築するには、各頂点の搬出距離と次数、入次数を明らかにする必要がある。入次数は図-2.6 中の丸で示した頂点と四角で示した頂点では 1 になり、三角で示した頂点では 2 になる。また、図-2.6 に示すように各頂点の $D(n_i) - 2D_{in}(n_i)$ の値は丸で示した頂点は 2 に、四角で示した頂点では -1 に、三角で示した頂点では 0 になる。ここで、幹線長を S_f 、幹線長と支線長との比を d とすれば、支線長は dS_f となる。また、幹線本数を m 、支線間隔を q 、支線本数を p 、幹線と幹線の間を距離は bS_f とする。したがって、作業道総延長 L は、 $S_f(dp + m)$ と表わせられる。ここで、 d, v, b は定数とし、 p は整数である。これを用いると、(2.14) 式のシグマ項は、図-2.6 で示した丸の頂点では (2.16) 式で、四角の頂点では (2.17) 式で表わせられる。

$$\sum_{i=2}^{n_i} [D(n_i) - 2D_{in}(n_i)](s_i)^2 = \sum_{i=1}^p [2(iq)^2] + \sum_{t=1}^{m-1} [2(q + tbdS_f)^2] \quad (2.16)$$

$$\sum_{i=2}^{n_i} [\mathbf{D}(n_i) - 2\mathbf{D}_{in}(n_i)](s_i)^2 = -\sum_{i=1}^p \{(\nu dS_f + iq)^2 + [(1-\nu)dS_f + ig]^2\} - \sum_{t=1}^{m-1} \{[(bd+1)S_f]^2 + (2q + bdS_f)^2\} - S_f^2 \quad (2.17)$$

また、三角の頂点では $\mathbf{D}(n_i) - 2\mathbf{D}_{in}(n_i)$ が 0 になるため、シグマ項も 0 となる。したがって、このモデルの平均搬出距離は S_{kh} は (2.18) 式で表わせられる。

$$S_{kh} = \frac{Sf[m(m-1)bd + m + (1-2\nu + 2\nu^2)d^2 p + dp + 2q^2(m-1)]}{2(dp+m)} \quad 0 \leq \nu + (n-1)b \leq 1 \quad (2.18)$$

さらに、支線間隔 q と支線本数 p との関係は、はしご型路網モデルの定義より、(2.19) 式となり、支線の端から最も近い幹線と支線との交点までの距離 (νdS_f と $[1-(n-1)b-\nu]dS_f$) は同距離と定義したことから、両者の関係は (2.20) 式となる。このことから、(2.18) 式は (2.21) 式に整理でき、これがこの路網モデルの平均搬出距離となる。

$$S_f = (p+1)q \quad (2.19)$$

$$b = \frac{1-2\nu}{m-1} \quad m \neq 1 \quad 0 < (m-1)b \leq 1 \quad (2.20)$$

$$S_{kh} = \frac{Sf[m(m-1)bd + m + \frac{1+(m-1)^2 b^2}{2} d^2 p + dp + \frac{2(m-1)}{(p+1)^2}]}{2(dp+m)} \quad m \neq 1 \quad 0 < (n-1)b \leq 1$$

$$S_{kh} = \frac{Sf[1 + (1-2\nu + 2\nu^2)d^2 p + dp]}{2(dp+1)} \quad m = 1 \quad 0 < (m-1)b \leq 1 \quad (2.21)$$

2.3.3 路網モデルの利用可能性の評価

はしご型路網モデルを現実の高密路網に適用し、平均搬出距離 S_{kh} を算出する。この平均搬出距離 S_{kh} とモデルを適用せずに算出した現実の平均搬出距離 S_{ka} との関係から、このはしご型路網モデルの利用可能性を評価する。平均搬出距離 S_{kh} にあたり、幹線長と支線長、幹線本数、支線本数、比率 b を現実

の高密路網から計測し、その値を用いて平均搬出距離 S_{kh} を算出する。これらの計測は ArcGIS を用いて、路網の各頂点を抽出し、距離計測ツールを適用することで、幹線長と支線長に加えて、 bdS_f に相当する部分の直線長を計測した。平均搬出距離の算出にあたっては、幹線長 S_f と支線長 dS_f は計測した各幹線と支線の直線長の平均値を用いた。また、比率 b は、計測した bdS_f に相当する部分の直線長の平均値を用いて算出した。ここで用いた路網は、平均傾斜が 20 度以上の 9 地域の高密路網（表-2.1）であり、その形状は GPS 測位によって得た。一方、現実の平均搬出距離 S_{ka} は、ArcGIS を用いて各頂点を抽出し、抽出した頂点の搬出距離と次数、入次数を算出して、それらの値を（2.14）式に代入して得た。

はしご型路網モデルを用いて算出した平均搬出距離 S_{kh} と、現実の平均搬出距離 S_{ka} との関係を図-2.7 に示す。現実の平均搬出距離は、はしご型路網モデルを用いて算出した平均搬出距離の 1.2~2.9 倍となった。はしご型路網モデルを用いて算出した平均搬出距離は各頂点の直線長から算出していることから、1.2~2.9 倍は迂回率を示していると考えられる。一般的な森林内での迂回率は 1.6（上飯坂 1971）であることから、本モデルは現実の高密路網の平均搬出距離の推定に利用可能であり、作業効率の高い配置形状の明確化にこのモデルは有効であると考えられる。

表-2.1 モデルを適用する高密路網の概要と搬出距離

対象地	面積 (ha)	路網密度 (m/ha)	搬出距離(m)		実測値とモデル値との比
			実測値	モデル値	
武儀	7.1	250.9	324.3	202.8	1.6
揖斐川	5.8	303.6	332.4	161.0	2.1
新生産	13.5	211.8	441.9	331.3	1.3
キビジリ	42.3	96.3	501.7	406.7	1.2
井ノ谷山	17.9	228.6	571.9	323.1	1.8
轟山	22.3	233.8	726.7	424.3	1.7
松井田	31.4	181.5	742.4	511.6	1.5
落合	25.3	239.8	780.0	394.6	2.0
滝向	23.4	239.3	843.0	470.7	1.8
重木山	35.2	241.4	937.8	393.8	2.4
葛城山	82.9	205.7	2070.0	719.5	2.9

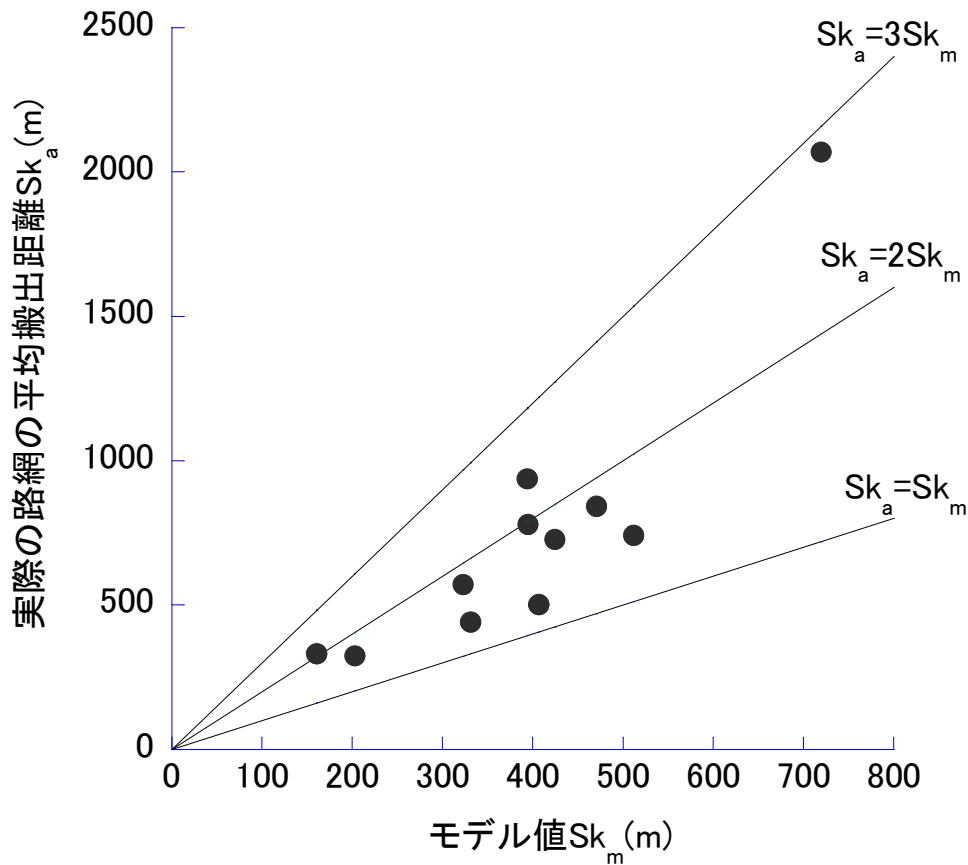


図-2.7 はしご型路網モデルの平均搬出距離 S_{kh} と現実の平均搬出距離 S_{ka} との関係

2.4 まとめ

作業効率の高い配置形状を明らかにするのに必要となる平均搬出距離の理論式として (2.14) 式を導出した。この式から、各頂点の搬出距離とその頂点の次数および次数を構成する入次数から平均搬出距離は算出できることが明らかになった。したがって、各頂点の搬出距離とその頂点の次数および次数を構成する入次数を算出できるツールを開発できれば、その路網での平均搬出距離を計算できる。平均搬出距離の算出ツールが開発されれば、既存の路網での搬出工程の経費算出や森林作業道の設計での代替

案の提示，最適な山土場の位置の検討への利用が期待できる。

また，作業効率の高い配置形状を明らかにするために，はしご型路網モデルを構築し，そのモデルの利用可能性を評価した。その結果，このモデルが実際の高密路網の評価に有効であることが示された。したがって，このモデルを用いて，配置形状と平均搬出距離との関係を分析すれば，作業効率の高い配置形状を明らかにすることができる。そこで第三章では，はしご型路網を構成する配置パラメータが平均搬出距離に与える影響を明らかにすることで，平均搬出距離が短くなる配置形状を明らかにする。

3章 平均搬出距離が短くなる配置形状

3.1 はじめに

第二章では作業効率の高い配置形状に必要な平均搬出距離の算出理論式の導出を行い、さらに作業効率の高い配置形状を明らかにするために、等高線に沿って等間隔に支線を配置したはしご型路網モデルを第二章では提示し、このモデルの利用可能性を評価した。その結果、はしご型路網モデルは現実の路網の平均搬出距離の推定に利用可能であり、平均搬出距離が短くなる配置形状を明らかにするのに有効であることが分かった。作業効率の高い配置形状は、等間隔に並行に路網を配置することと、路網全体としての平均搬出距離が最も短いこととであり、このはしご型路網モデルは作業効率の高い配置形状の2条件の中で、「等間隔に並行に路網を配置すること」を満たすように構築していることから、作業効率の高い配置形状を明らかにするためには、「路網全体としての平均搬出距離が最も短いこと」がどのような配置形状であるかを明らかにする必要がある。

そこで、第三章では第二章で提示したはしご型路網モデルを用いて、平均搬出距離が最も短くなる配置形状を明らかにすることを目的とする。そのために、はしご型路網モデルの配置パラメータが平均搬出距離に与える影響を分析する。

3.2 分析に用いるパラメータと分析方法

第二章で提示したはしご型路網の平均搬出距離を算出する式を構成する配置パラメータは、支線の端から最も近い幹線と支線との交点までの距離と支線長との比 v 、すなわち起点となる幹線の位置を決定する変数、幹線長、幹線本数、支線長、支線間隔（支線本数）が挙げられる。しかし、幹線長と支線長は伐区によって、決まるパラメータであることから、ここでは起点となる幹線の位置を決定する変数 v 、幹線本数 m と支線間隔 q （支線本数 P ）が平均搬出距離に与える影響を分析する。

各配置パラメータが平均搬出距離に与える影響を明らかにするためには、伐区の形状で決まる幹線長と支線長との比 d の影響を取り除く必要がある。酒井ら（1979）によると、実際の伐区の面積と伐区の周長の関係から、伐区の形状は矩形であることを明らかにした。さらに、井上（1989）によると、伐区の短辺：長辺は1：1～4であることを示している。そこで、ここでは幹線長と支線長の比である d を実際の伐区の短辺：長辺の範囲内にある1と設定することで、伐区の形状で決まる幹線長と支線長との比 d の影響を排除する。また、幹線長の影響をなくすため、幹線の長さを単位のない1と比で表現する。したがって支線の長さも1となる正方形の伐区を用いて、各配置パラメータと平均搬出距離との関係を分析する。

3.3 はしご型モデルを構成する各配置パラメータが平均搬出距離に与える影響結果

3.3.1 幹線の位置を決定する変数 ν の影響

支線間隔別の幹線の位置を決定する変数 ν と平均搬出距離との関係を図-3.1に示す。図-3.1から、幹線本数に関わらず、 ν が大きいほど、平均搬出距離が短くなり、 ν が限りなく0.5に近づいた配置で平均搬出距離が最も短くなることが分かった。また、平均搬出距離が最も短くなる支線間隔 q は、幹線本数によって異なり、幹線1本では支線間隔0.5であり、複数本では支線間隔0.25であった。ここから、幹線本数別に平均搬出距離の最大値と最小値を算出し、最大値と最小値の差を最大値で除した減少率を算出し、この減少率を用いて、この ν が平均搬出距離に与える影響を評価した。その結果(図-3.2)、幹線本数1本では支線間隔が小さくなると減少率は大きくなり、幹線本数が複数本では1本である支線間隔が大きくなると減少率は大きくなった。減少率の範囲は、幹線本数1本では15~25%、複数本では25~40%となり、特に複数本では ν が平均搬出距離に与える影響は大きいことが分かる。また、平均搬出距離が最長なのは、 ν が0であり、最短なのは ν が限りなく0.5に近づく場合であることから、作業効率の高い配置は幹線1本では支線の midpoint に幹線であり、複数本では幹線間距離を限りなく小さくすることが分かった。

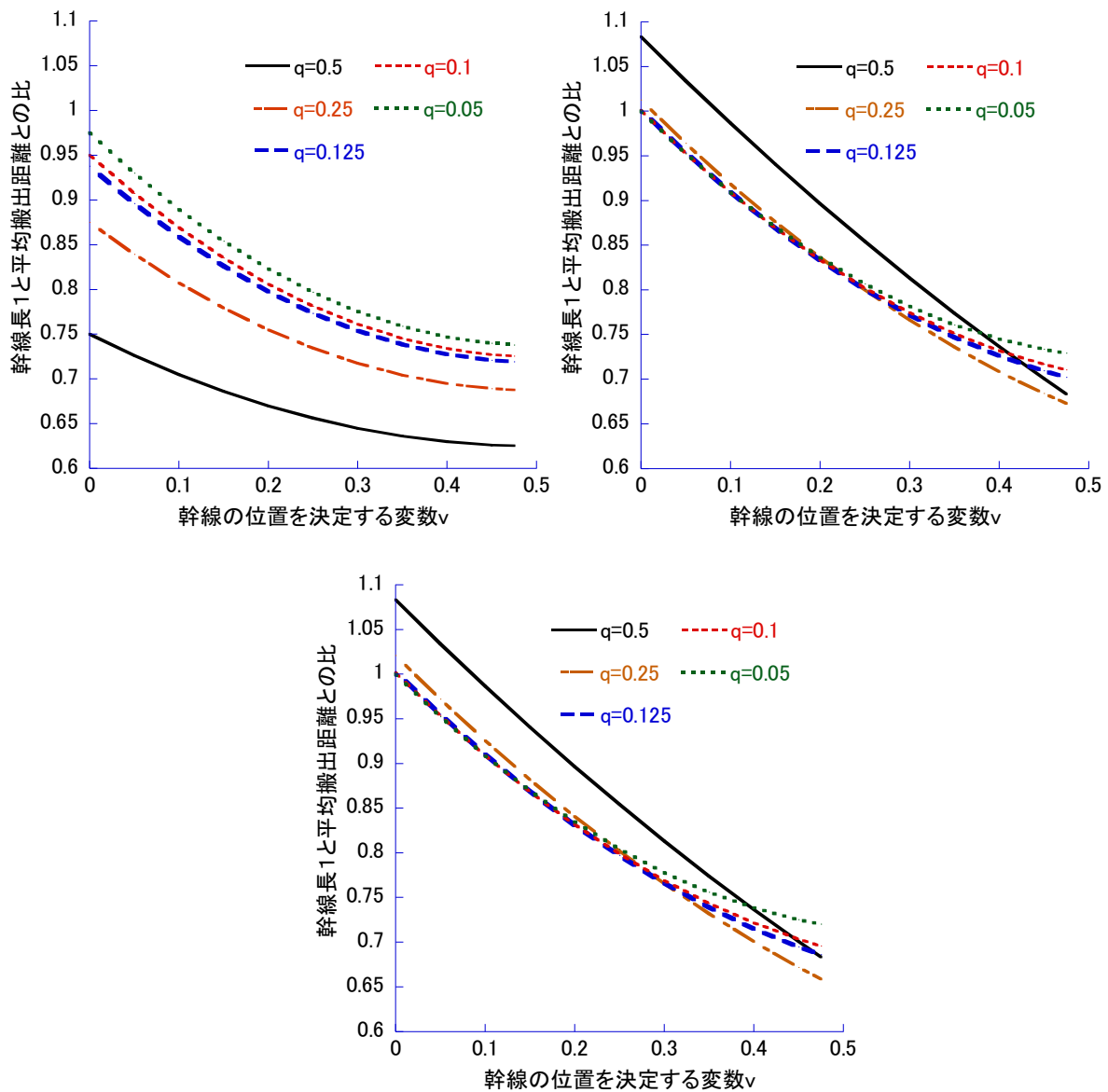


図-3.1 支線間隔別の幹線距離と幹線長 1 に対する平均搬出距離の比との関係

上左図: 幹線本数1本, 上右図: 幹線本数2本, 下図: 幹線3本

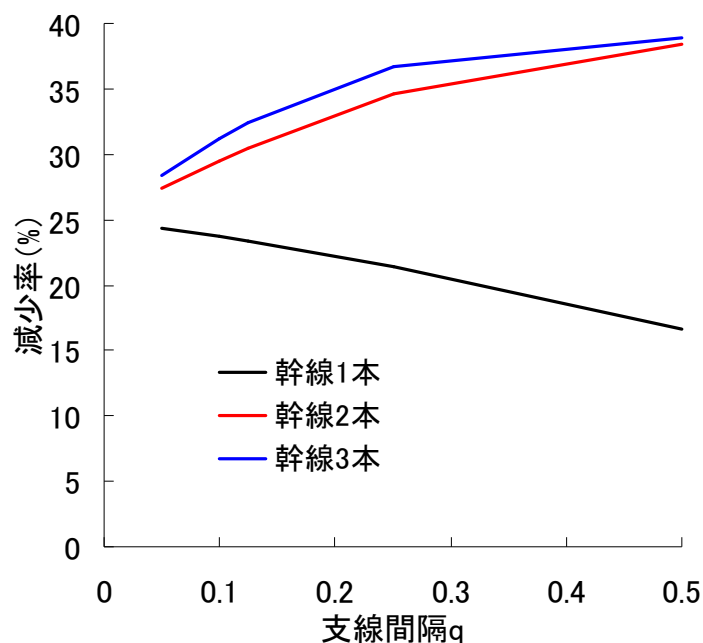


図-3.2 幹線本数別の支線間隔と減少率との関係

3.3.2 幹線本数の影響

幹線本数別の幹線の位置を決定する変数 ν と平均搬出距離との関係を図-3.3に示す。図-3.3より、図-3.1と同様に幹線の位置を決定する変数 ν が大きいほど、平均搬出距離が短くなるが、最も平均搬出距離が短くなる配置、すなわち ν が限りなく0.5に近づく配置の幹線本数は、支線間隔によって異なり、支線間隔0.5では幹線本数1本だが、支線間隔0.1と0.05では幹線2本となった。ここから、各 ν での平均搬出距離の最大値と最小値を抽出し、そこから最大値と最小値との差を最大値で除した減少率を算出し、この減少率を用いて、幹線本数が平均搬出距離に与える影響を評価した。その結果(図-3.4)、支線間隔0.5では減少率が最大で33.3%となったが、支線間隔が小さくなるにつれて、その減少率は小さくなっており、支線間隔0.125以下の狭い間隔では ν に関わらず、減少率は10%以下であった。また、平均搬出距離が最も短くなる ν が限りなく0.5に近づいた配置で、支線間隔0.5より狭い支線間隔では、減少率は10%以下であった。このことから、支線間隔0.5で ν が大きい配置では、幹線本数が平均搬出距離に与える影響は大きい、支線間隔が0.5より狭い配置や ν が大きい配置では、幹線本数が平均搬出距離に与える影響は小さい。

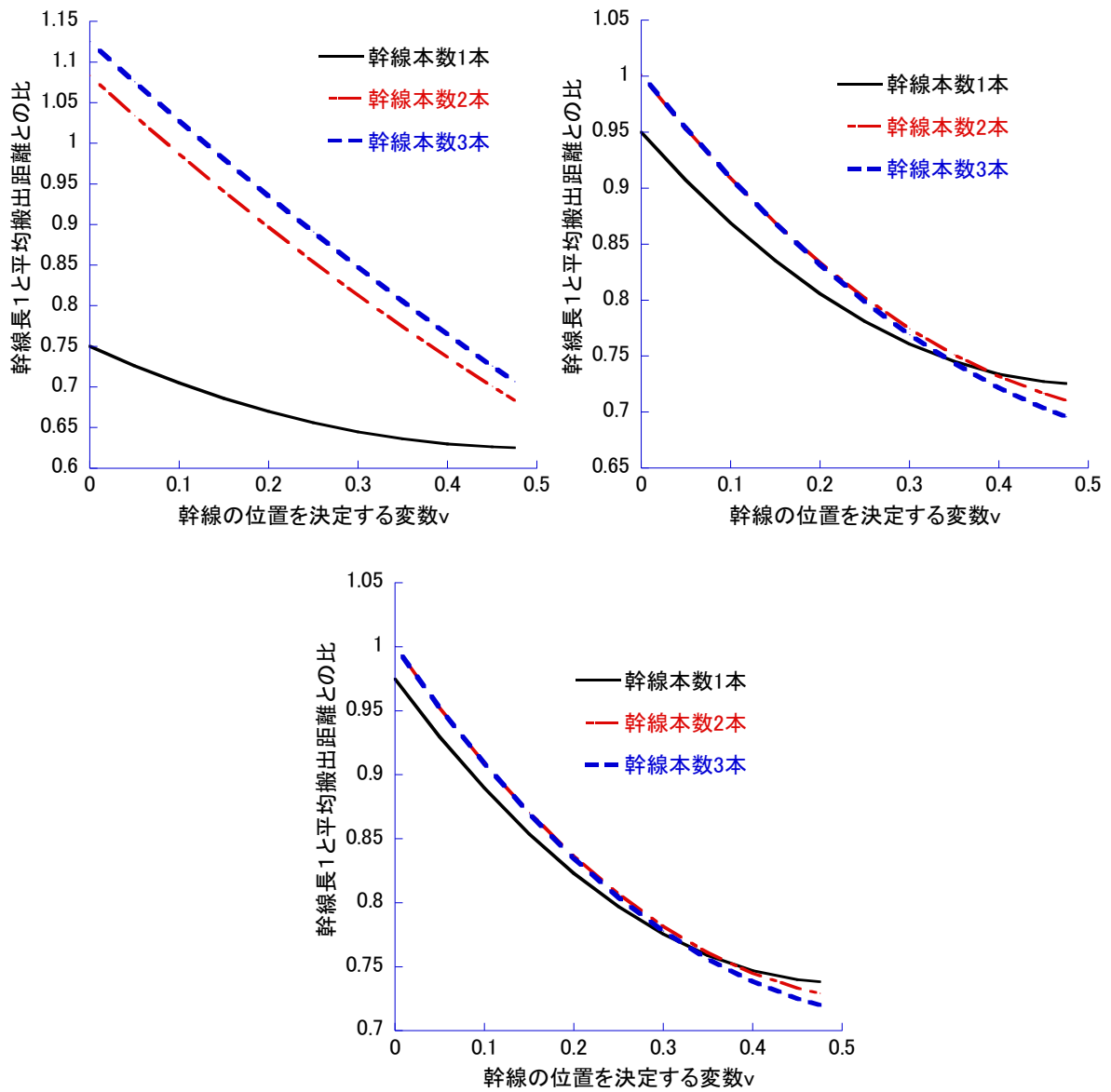


図-3.3 幹線本数別の v と幹線長 1 に対する平均搬出距離の比との関係

上左図: 支線間隔 0.5 の場合, 上右図: 支線間隔 0.1 の場合, 下図: 支線間隔 0.05 の場合

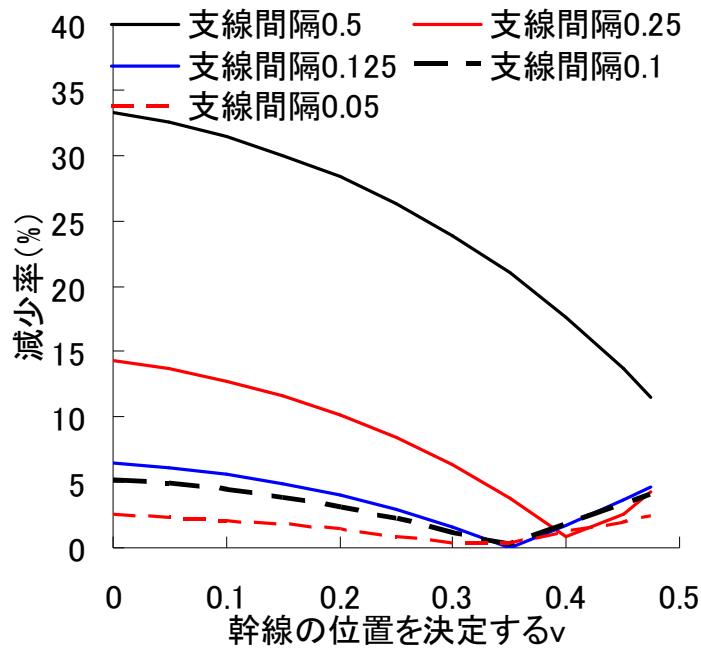


図-3.4 支線間隔別の幹線の位置を決定する ν と減少率との関係

3.3.3 支線間隔の影響

幹線本数別の支線間隔と平均搬出距離との関係を図-3.5に示す。ただし、 ν の値によって平均搬出距離は異なるため、ここでは ν が0と ν が0.2、 ν が限りなく0.5に近づく($\nu \doteq 0.5$ または $(n-1)b \doteq 0$)の3種類を示す。 $\nu \doteq 0.5$ と設定したのは、幹線が複数本ある場合では $\nu=0.5$ があり得ないため、ここでは幹線が最も近づく配置として $\nu \doteq 0.5$ を用いた。図-3.5から、幹線1本と複数本とでは支線間隔と平均搬出距離との関係が大きく異なるが、支線間隔比0の極限值では幹線本数に関係なく同様の値となった。幹線1本では支線間隔と平均搬出距離は負の線形関係であるのに対し、幹線本数が複数本の場合は下に凸の分布形を示し、平均搬出距離が最小となる支線間隔が存在している。ここから、幹線本数別に平均搬出距離の最大値と最小値を抽出し、そこから最大値と最小値との差を最大値で除した減少率を算出し、この減少率を用いて、支線間隔が平均搬出距離に与える影響を評価した。その結果(図-3.6)、幹線本数1本では ν に関わらず、減少率が15%以上となり、 ν が0では23%を示したが、幹線本数が複数本では ν に関わらず、減少率は10%前後であった。このことから、幹線1本では支線間隔が平均搬出距離に与える影響は大きい、幹線が複数本の配置では影響度は小さい。

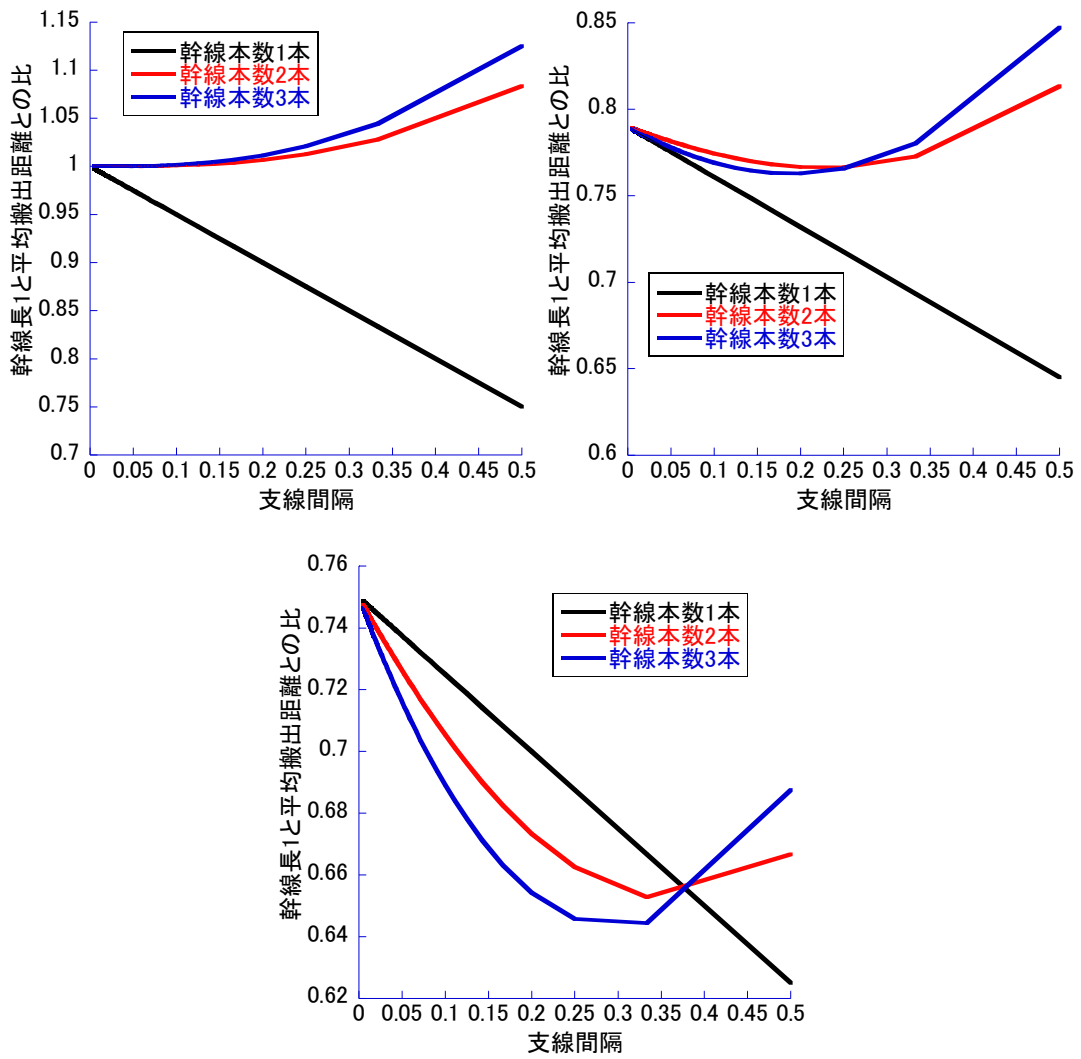
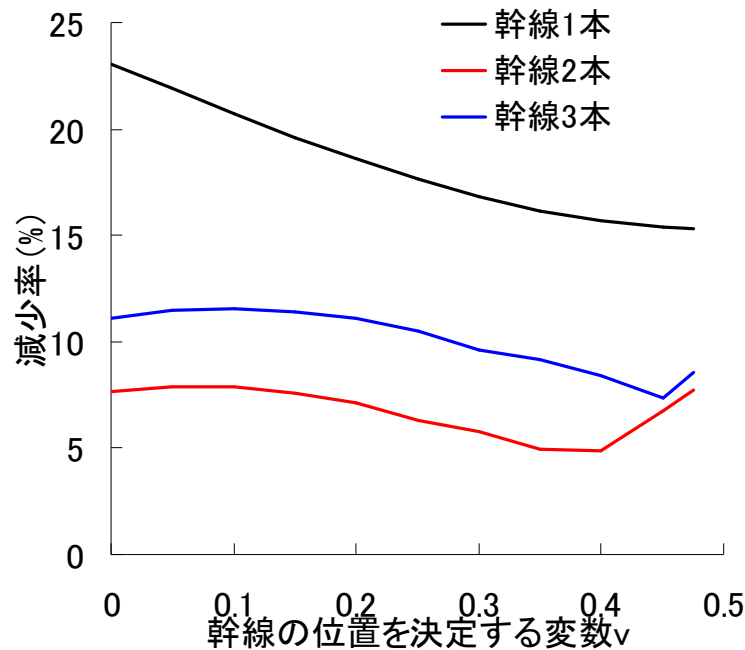


図-3.5 幹線本数別の支線間隔と幹線長1に対する平均搬出距離の比との関係

上左図: $\nu = 0$, 上右図: $\nu = 0.2$, 下図: $\nu = 0.5$



図－3.6 幹線本数別の幹線の位置を決定する変数 v と減少率との関係

3.4 配置形状が平均搬出距離に与える影響

はしご型路網モデルを構成する各配置パラメータが平均搬出距離に与える影響の結果から、幹線複数本の配置では支線間隔の影響は小さく、 v の影響が大きいことが明らかとなり、幹線1本の配置では支線間隔と v の影響が大きいことが明らかとなった。また、図－3.1, 3.5 から、同伐区形状で平均搬出距離が最も短くなる配置は、 v が限りなく 0.5 に近づく配置であり、図－3.5 の下図より平均搬出距離が最も短くなる配置は、支線本数が1本の配置（幹線長1の場合の支線間隔0.5）では幹線1本の場合であり、それより支線本数が多くなる（支線間隔が小さくなる）と、平均搬出距離が最も短くなる配置は幹線が複数本の場合であることが分かる。一方で、同伐区形状で平均搬出距離が最も長くなる配置は図－3.1, 3.5 の上左図から、 v が0であり、幹線本数1本では支線間隔が限りなく0に近づいた配置で、幹線が複数本では支線本数が1本の配置（幹線長1の場合の支線間隔0.5）であることが分かる。そこで、ここでは配置形状による平均搬出距離の変動範囲を明らかにするために、平均搬出距離が最も長い v が0である配置形状での平均搬出距離と平均搬出距離が最も短い配置での平均搬出距離を支線間隔別に算出し、その差から影響を評価する。なお、支線間隔はグラップル木寄せを想定した 50 m とタワー

ヤード木寄せを想定した 400 m とする。なお、これまでは幹線の長さを単位のない 1 と表現して、分析を行ったが、その場合、支線間隔を 50 m や 400 m に設定することができない。そこで、ここでは幹線長を長さの単位のない 1 と比で表現せず、長さの単位のある数値を用い、幹線長と支線長とを乗じた値を面積として、その面積ごとに支線間隔別の平均搬出距離を算出した。なお、伐区の形状で決まる幹線長と支線長との比 d はこれまでと同様に 1 とする。支線間隔別の面積と配置形状による平均搬出距離との関係を図-3.7 に示す。図-3.7 より、面積と平均搬出距離は累乗の関係であることが分かる。平均搬出距離が最長な配置形状では支線間隔 50 m と 400 m とともに同様の値を示しているが、平均搬出距離が最短な配置形状では支線間隔 400 m の方が短い。そのため、支線間隔が狭いほうが平均搬出距離が最長な配置形状と最短な配置形状での平均搬出距離の差は小さくなる。これまで平均搬出距離は、路網を分岐のない 1 本道と仮定して、算出しているため、面積と平均搬出距離との関係は直線であった。しかし、分岐や循環のある路網の平均搬出距離と面積との関係は、累乗であることから、これまでの分析では、平均搬出距離を長めに推定していた可能性がある。

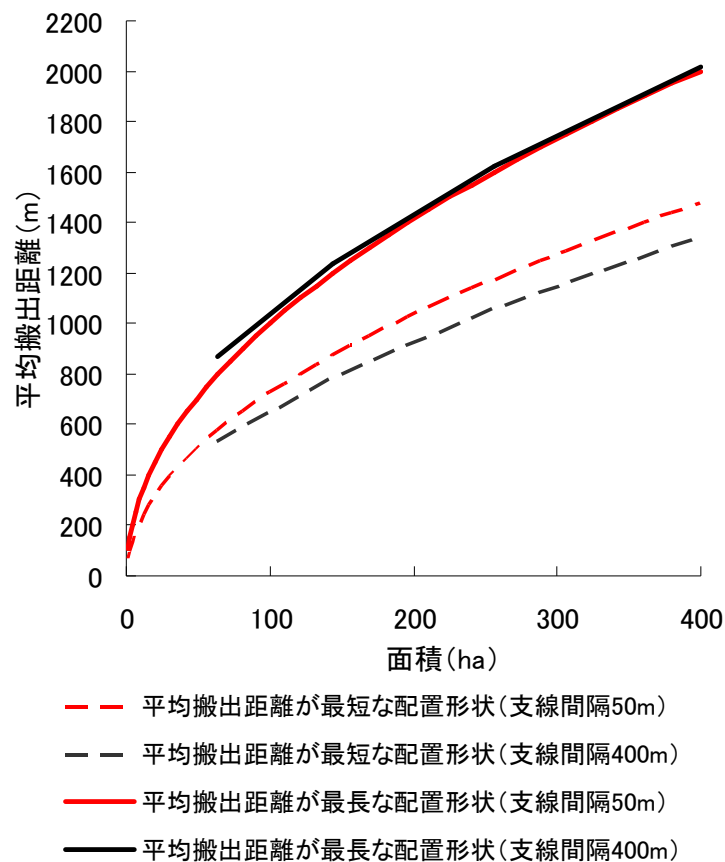


図-3.7 支線間隔別の面積と配置形状による平均搬出距離との関係

3.5 まとめ

はしご型路網モデルを構成する配置パラメータの値を変化させて、平均搬出距離に与える影響を分析した結果、幹線複数本の配置では支線間隔の影響は小さく、 ν の影響が大きいことが明らかとなり、幹線1本の配置では支線間隔と ν の影響が大きいことが明らかとなった。この結果から、平均搬出距離が短くなる配置形状は、 ν が限りなく0.5に近づく配置($\nu \doteq 0.5$)であり、平均搬出距離が最長となる配置は、 $\nu = 0$ の配置であることが明らかとなった。さらに、両配置から、分岐や循環のある路網の配置形状による平均搬出距離の変動範囲が明らかとなった。

しかし、 $\nu \doteq 0.5$ では、幹線間の距離がほとんどないことになり、交通利便性の向上や代替路の確保に寄与できないため、実際にはありえない配置である。交通利便性の向上や代替路の確保を考慮すると、 ν の値はある程度大きくなるほうがよいが、平均搬出距離を考慮すると、 ν の値は小さい方がよく、両者はトレードオフな関係である。最適な ν が何であるかを決定することは本研究では難しく、これは今後の課題である。

また、作業効率が高い配置形状を明らかにするためには、各配置形状での木材搬出経費を明らかにする必要がある。第三章で平均搬出距離が短くなる配置形状が明らかになったことから、配置形状と木材搬出経費との関係を明らかにすることができる。そこで、第四章ではそれらの関係を明らかにし、路網の配置形状によって経費はどのように変化するかを明らかにする。

4章 配置形状が木材搬出経費に与える影響

4.1 はじめに

林業の採算性の向上を目指して、高密度路網と車両系林業機械とを組み合わせたシステムが提案されており、そのようなシステムを確立させるには、それぞれの林分や地形に適したシステムを明示することが重要である。そのためには、様々な林分や地形での各システムを用いた場合の経費を算出する必要がある。これまでに中澤ら（2006）は、7種類の全木集材の搬出経費を算出した結果、タワーヤード・プロセッサのシステムの経費が最も安いことを示している。また、石川ら（2008）は、ウィンチ付グラップルの作業時間と幹材積との関係から、ウィンチ付グラップル集材システムの作業に適する面積は10 ha以下であることを明らかにしている。これまでは分岐や循環のある路網の平均搬出距離を算出する理論式が構築されていなかったため、起点から地番の重心までの距離を平均搬出距離として用いていた。しかし、第二章で分岐や循環のある路網の平均搬出距離を算出する理論式を導出し、また作業効率の高い配置形状を明らかにするために、はしご型路網モデルを構築した。これによって、分岐や循環のある路網の平均搬出距離が算出可能となった。さらに、第三章ではこのはしご型路網において、平均搬出距離に最も影響のある因子は、起点がある幹線の位置を決定付ける ν であり、作業効率の高い配置形状は、 ν が限りなく0.5に近づく配置（ $\nu \div 0.5$ ）で、平均搬出距離が最長となる配置は、 $\nu = 0$ の配置であることが明らかとなった。はしご型路網での平均搬出距離と配置形状との関係が明らかとなったことから、分岐や循環のある路網での木材搬出経費を試算できる。

そこで、第四章では様々な林分で分岐や循環のある路網での車両系システムの経費を試算し、各林分で最も経費の安い作業システムを明らかにすることと、配置形状が木材搬出経費に与える影響を明らかにすることを目的とする。そのために、異なる2種類の立木サイズを対象林分に、車両系システムの経費を試算する。さらに、第二章、第三章で明らかになった平均搬出距離が短くなる配置形状と長くなる配置形状での木材搬出経費を算出し、そこから配置によってどの程度経費が変わるかを明らかにする。

4.2 想定するシステムと経費の算出方法

4.2.1 想定するシステムと路網モデル

想定する作業システムは表-1.2で示されたシステムで、今後の普及拡大が見込まれる作業システムである2システムとする（表-4.1）。システム1, 2ともに伐倒工程はチェーンソーを、造材工程はプロセッサを、搬出工程はフォワーダを用いたシステムとし、木寄せ工程はシステム1ではウィンチ付グ

ラップルを、システム 2 ではタワーヤードを用いる。また、ウィンチ付きグラップルとタワーヤード、プロセッサでは 12t クラス（標準バケット容量 0.45m³）を、フォワーダでは積載量 6t クラスとする。これらのシステムの作業はそれぞれが独立して行われる直列作業とする。

想定する路網モデルは、はしご型とする。幹線の本数が 1 本の場合、交通利便性の向上が望めず、代替路の確保ができないことから、ここでは幹線を 2 本とする。第三章から平均搬出距離に最も影響のある因子は起点がある幹線の位置を決定付ける ν であり、作業効率の高い配置形状は、 ν が限りなく 0.5 に近づく配置（ $\nu \doteq 0.5$ ）で、平均搬出距離が最長となる配置は、 $\nu = 0$ の配置であることから、現実には考えられないが作業効率の高い配置形状 $\nu \doteq 0.5$ の場合（以下、合理的な配置とする）と $\nu = 0$ の場合（以下、非合理的な配置とする）での経費、すなわち配置形状による最大木材搬出経費と最少経費を算出して、そこから搬出経費の配置形状による影響を評価する。

ただし、伐区は $d = 1$ の正方形の形状とし、幹線長と支線長を乗じた値を面積とする。分析に用いる立木は今後考えられる長伐期施業で生産される大径木とこれまでの施業で生産される立木との 2 種類を用いる。両林分は収穫表作成システム（LYCS）から得られた値とし、長伐期施業で生産される大径木は樹高を 28 m、1 本あたりの利用幹材積を 1.0 m³/本、その林分を 660 m³/ha と設定し、これまでの施業で生産される立木は樹高を 18 m、1 本あたりの利用幹材積を 0.3 m³/本、その林分を 360 m³/ha とする。なお、前提条件として集材対象の丸太は作業路の延長方向に対して隔たりなく分布していることとする。

表-4.1 想定するシステム

	伐木工程	木寄せ工程	造材工程	搬出工程
システム 1	チェーンソー	ウィンチ付 グラップル	ハーベスタ	グラップル付 フォワーダ
システム 2	チェーンソー	タワーヤード	ハーベスタ	グラップル付 フォワーダ

4.2.2 木材搬出に関わる経費の算出

本研究で算出する経費は、チェーンソー伐倒、プロセッサ造材、タワーヤード木寄せ、グラップル木寄せ、フォワーダ搬出、作業道開設にかかる経費とし、機械運搬費や人員輸送費等の間接費はなしとする。タワーヤード木寄せ以外のチェーンソー伐倒、プロセッサ造材、グラップル木寄せ、フォワーダ搬出、作業道開設にかかる経費の算出はサイクルタイムと1時間あたりの経費とhaあたりの丸太材積から算出する石川ら（2008）の式を用いる。タワーヤード木寄せは架設・撤去に要する時間もあるため、ここでは石川らの式に架設・撤去費を加えた式を用いる。以下に各工程の経費算出式を示す。

丸太1m³あたりのチェーンソー伐倒による経費 MC_f （円/m³）は（4.1）式を用いて算出する。

$$MC_f = \frac{C_f \times T_f \times V_u}{V_{u1} \times V_t \times 3600} \quad (4.1)$$

C_f ：1時間あたりの伐倒経費（円/時）， T_f ：1本あたりの伐倒時間（秒/本）， V_u ：haあたりの利用木幹材積（m³/ha）， V_{u1} ：1本あたりの利用木幹材積（m³/本）， V_t ：haあたりの丸太材積（m³/ha）

チェーンソーによる1本あたりの伐倒時間 T_f の中で、チェーンソー伐倒の鋸断時間は酒井ら（1988）によって、立木材積 V_{u1} （m³/本）に比例することが明らかになっていることから、ここでは鋸断以外の作業時間 O_f を加えた次式からチェーンソー伐倒の作業時間 T_f （秒/本）を算出する。

$$C_f = a_1 V_t + O_f \quad (4.2)$$

ここで a_1 ：単位材積あたりの鋸断関係時間（秒/m³）， O_f ：受口・追い口切り以外の作業時間（秒/本）

丸太1m³あたりのタワーヤード木寄せによる経費 MC_{yt} （円/m³）は木寄せ時間と架設・撤去時間を加えた（4.3）式を用いて算出する。

$$MC_{yt} = \frac{C_{yt} \times T_{yt} \times V_u}{V_{u1} \times V_t \times 3600} + \frac{l_c \times s_p \times s_t \times 100^2}{v_t \times k_y \times k_c \times 4 \times 60} \quad (4.3)$$

C_{yt} : 1 時間あたりのタワーヤーダ木寄せ経費 (円/時), T_{yt} : 1 本あたりのタワーヤーダ木寄せ時間 (秒/本), l_c : 単位時間労務費経費 (円/時・人), s_p : 架設・撤去にかかる人員 (人), s_t : 架設・撤去時間 (分), k_y : 1 本あたりの平均横取り距離 (m/本), k_c : 平均木寄せ距離 (m/本)

1 本あたりのタワーヤーダ木寄せ時間 (秒/本) は澤口 (1996) のモデル式を用いる。このモデル式は搬器の往復の平均搬器走行速度 v_c (m/秒) と平均横取り速度 v_y (m/秒), 荷掛け・荷下ろし時間 O_{yt} (秒/本), 平均木寄せ距離 k_c , 平均横取り距離 k_y から, (4.4) 式で表される。

$$T_{yt} = \frac{2k_c}{v_c} + \frac{2k_y}{v_y} + O_{yt} \quad (4.4)$$

本研究では, はしご型路網を用いていることから, 道路間隔 d (m) の $1/4$ が平均木寄せ距離 k_c となる。丸太 1m^3 あたりのグラップル木寄せによる経費 MC_{yg} (円/ m^3) は (4.5) 式を用いて算出する。

$$MC_{yg} = \frac{C_{yg} \times T_{yg} \times V_u}{V_{u1} \times V_t \times 3600} \quad (4.5)$$

C_{yg} : 1 時間あたりのグラップル木寄せ経費 (円/時), T_{yg} : 1 本あたりのグラップル木寄せ時間 (秒/本)

本研究では, 等間隔に道路が配置されていることから, ウィンチ付きグラップルの木寄せ作業の作業時間 T_{yg} (秒/本) はウィンチによる引き出し・引き寄せ時間 T_w (秒/本), グラップルによる引き出し時間 T_g (秒/本), その他の時間 O_{yg} (秒/本) から次式で求める。

$$T_{yg} = T_w + T_g + O_{yg} \quad (4.6)$$

道路間隔が d (m) のとき, 1 本あたりの平均木寄せ距離は $d/4$ (m/本) となることから, ウィンチによる引き出し・引き寄せ時間 T_w (秒/本) は (4.7) 式で表さる。また T_g (秒/本) は石川ら (2008) の

(4.8) 式を用いる。

$$T_w = \frac{d}{4} \times \left(\frac{1}{v_w} + \frac{1}{v'_w} \right) \quad (4.7)$$

$$T_g = a_2 V_{u1} \quad (4.8)$$

ここで v_w : ワイヤロープの引き出し速度 (m/秒), v'_w : ウィンチの巻き取り速度 (m/秒), a_2 : 単位材積あたりのグラップルによる引き出し時間 (秒/m³)

丸太 1m³あたりのプロセッサ造材による経費 MC_p (円/m³) は (4.9) 式を用いて算出する。

$$MC_p = \frac{C_p \times T_p \times V_u}{V_{u1} \times V_l \times 3600} \quad (4.9)$$

C_p : 1時間あたりのプロセッサ造材経費 (円/時), T_p : 1本あたりのプロセッサ造材時間 (秒/本)

プロセッサ造材の作業時間 T_p (秒) は, U. スンドベリ (1996) によれば処理木の長さ H (m/本) とプロセッサの材送り速度 v_p (m/秒) で決まる。しかし, この式では土場での造材を念頭に作られたものであり, 作業道上でプロセッサが移動を繰り返しながら造材する場合にそのまま適用することは困難だと考えられる。そこで, ここでは材送り・玉切り以外の移動の時間 O_p (秒/本) を加えた (4.10) 式から求める。

$$C_p = \frac{H-l}{v_p} + O_p \quad (4.10)$$

ここで l : 材送り前にプロセッサに送り込まれていた材の長さ (m/本)

材送り・玉切り以外の移動の時間 O_p は路網密度によって変化することから, ここでは v_{pp} をプロセッサの平均移動速度(m/秒)として, 次式を用いて算出する。

$$O_p = \frac{D \times V_{u1}}{V_{pp} \times V_t} \quad (4.11)$$

丸太 1m³あたりのフォワーダ搬出による経費 MC_{sf} (円/m³) は (4.12) 式を用いて算出する。

$$MC_{sf} = \frac{C_{sf} \times T_{sf}}{V_f \times 3600} \quad (4.12)$$

C_{sf} : 1 時間あたりのフォワーダ搬出経費 (円/時), T_{sf} : 1 回あたりのフォワーダ搬出時間 (秒/回), V_f : 1 回あたりのフォワーダ積載量 (m³/回)

フォワーダ搬出 1 往復の作業時間 T_c (秒/回) は, フォワーダに搭載しているグラップルローダによる積み込み作業時間 T_L (秒/回), 走行時間 T_R (秒/回), その他の時間 O_c (秒/回) から次式で求める。

$$T_c = T_L + T_R + O_c \quad (4.13)$$

T_R は, 平均搬出距離を S_k (m/回), フォワーダの空走行速度を v_f (m/秒), 実走行速度を v'_f (m/秒) として, (4.14) 式で求める。

$$C_R = S_k \times \left(\frac{1}{v_f} + \frac{1}{v'_f} \right) \quad (4.14)$$

なお, 平均搬出距離 S_k は第二章で構築した (2.20) 式を用いて算出する。

丸太 1m³あたりの作業道開設による経費 MC_r (円/m³) は (4.15) 式を用いて算出する。

$$MC_c = \frac{C_c \times T_c \times D}{V_t \times 3600} \quad (4.15)$$

C_c : 1時間あたりの作業道作設経費 (円/時), T_c : 1mあたりの作設時間 (秒/m), D : 路網密度 (m/ha)

路網密度は (4.16) 式を用いて算出する。

$$D = \frac{2 + g}{sf} \quad (4.16)$$

Sf : 幹線長 (m), g : 支線本数

チェーンソー伐倒, プロセッサ造材, タワーヤード木寄せ, グラップル木寄せ, フォワーダ搬出の1時間あたりの経費は既存の報告 (全国林業改良普及協会 2001) を用いる。また, 造材の歩留まりを 0.66 と設定し, そこから 1 ha あたりの丸太材積 V_r を算出する。経費の算出に用いる各パラメータの値を表 4.2 に示す。ここで出典が複数あるものは, これらの報告書の平均値である。

表 4.2 木材搬出経費の算出に用いる各パラメータの値

作業工程	説明	記号	数値	単位	出典	
伐倒	鋸断時間の係数	a_1	90.5	秒/m ³	酒井ら 1988	
	鋸断以外の要素作業時間	O_f	64.1	秒/本		
	ワイヤロープの引き出し速度	v_w	1.92	m/秒	石川ら 2008	
	ワイヤロープの巻き取り速度	v_w'	0.77	m/秒	イワフジ工業株式会社 2011a	
	グラップル時間の係数	a_2	60.8	秒/m ³	石川ら 2008	
	荷掛け・荷下ろし (ウインチ付きグラップル)	O_{yg}	124	秒/本		
集材	道路間隔 (ウインチ付グラップル)	d	50	m	仮定	
	人件費 (タワーヤード)	l_c	2500	円/時	澤口 1996	
	架設撤去時間	Sp	180	分		
	架設撤去人員	St	3	人		
	平均搬器走行速度	v_c	2.7	m/秒		
	平均横取り速度	v_x	0.5	m/秒		
	荷掛け・荷下ろし (タワーヤード)	O_{yt}	50	秒/本		
	平均横取り距離	kc	10	m/本		
	平均木寄せ距離	ky	100	m/本		仮定
	材送り前にプロセッサに送り込まれている材長	l	2	m/本		スンドベリー 1996
造材	プロセッサの送材速度	v_p	0.3	m/秒		関西研究チーム 1995, 1996, 木幡 2002, 松尾 1996, 谷山 2001, 立切 1994, 臼井 1995
	移動速度	v_{pd}	1	m/秒	仮定	
搬出	1回の丸太積み込みに要する時間	T_L	15.5	秒/回	酒井ら 1996	
	フォワーダの空走行速度	v_L	2	m/秒	岡ら 2007, イワフジ工業株式会社	
	フォワーダの実走行速度	v_L'	1	m/秒	2011b	
	積み込み, 走行以外の作業時間	O_C	1314.8	秒/回	酒井ら 1996	
作業道開設	時間あたりの作業道作設経費	C_L	6020	円/時	石川ら 2008	
	mあたりの作設時間	T_C	320.5	秒/m		

4.3 結果

4.3.1 各立木サイズで木材搬出経費が最も安い作業システム

ここでは、各立木サイズで木材搬出経費が最も安い作業システムを明らかにする。したがって、配置形状の影響を排除するために、合理的な路網のみを用いて、分析を行う。合理的な路網でのシステム別の面積と木材搬出経費との関係を図-4.1 に示す。図-4.1 より立木の大きさに関わらず、システム 2 の経費は面積とほぼ線形関係であるのに対し、システム 1 は下に凸の関係であり、最少経費となる面積は石川ら (2008) とほぼ同様の結果で、 $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ では 12.25 ha (幹線長 350 m) で、 $1.0 \text{ m}^3/\text{本}$ では 6.25 ha (幹線長 250 m) であった。立木材積が大きくなると、両システムとも木材搬出経費は低くなるが、立木の大きさによって、経費の安いシステムが異なり、 $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ では、システム 1 が安いのに対し、 $1.0 \text{ m}^3/\text{本}$ ではシステム 2 が安い。次に、林業機械を用いている造材工程、木寄せ工程、搬出工程の経費と面積との関係を図-4.2 に示す。この図から、両システムとも立木が大きくなると、フォワーダ搬出費以外の費用が安くなる、特にプロセッサ造材費やグラップルやタワーヤード木寄せ費が安くなっている。 $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ での木寄せ費はグラップルでは $2673 \text{ 円}/\text{m}^3$ であるのに対し、タワーヤードでは $5272 \text{ 円}/\text{m}^3$ とタワーヤードの方が約 $2600 \text{ 円}/\text{m}^3$ 高い一方で、 $1.0 \text{ m}^3/\text{本}$ での木寄せ費はグラップルでは $1067 \text{ 円}/\text{m}^3$ であるのに対し、タワーヤードでは $1228 \text{ 円}/\text{m}^3$ とその差は約 $160 \text{ 円}/\text{m}^3$ にまで縮まっている。このことから、立木が大きくなると、木寄せ機械に関係なく、木寄せ費は減少するが、グラップル木寄せ費よりもタワーヤード木寄せ費の減少が大きいいため、立木の大きさによって、経費の安いシステムが異なってしまうことが分かる。また、最も経費の高い工程は $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ のシステム 1 では、プロセッサ造材で、システム 2 ではタワーヤード木寄せであり、 $1.0 \text{ m}^3/\text{本}$ では $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ と比べて木寄せ費は安くなったのに対し、フォワーダ搬出費は安くなっていないため、最も経費の高い工程は両システムともフォワーダ搬出費であった。以上から、立木の太径化を目指す場合は高密度な路網が必要なグラップル木寄せよりはタワーヤード木寄せの方の経費が安く、その場合に最も経費の高い工程はフォワーダ搬出であることが分かった。

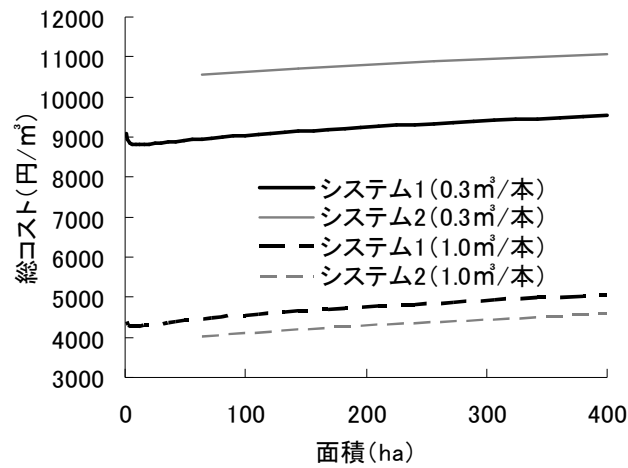


図-4.1 合理的な路網でのシステム別の面積と木材搬出経費との関係

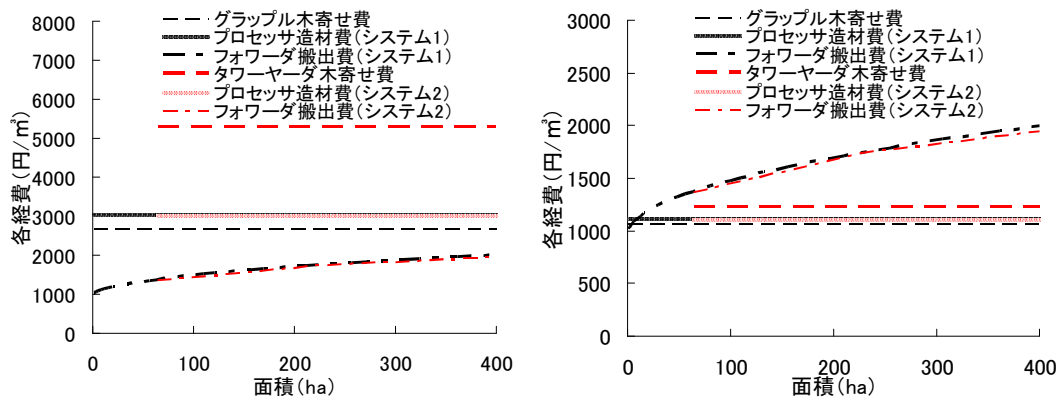


図-4.2 造材工程、木寄せ工程、搬出工程の経費と面積との関係

左図：0.3 m³/本，右図：1.0 m³/本

4.3.2 配置形状と搬出経費との関係

配置形状別の面積と木材搬出経費との関係を図-4.3に示す。ただし、配置形状によって影響を受けるのは、フォワーダ搬出費だけであり、他の工程に影響を与えない。このことから、立木による違いは生じないことから、ここでは0.3 m³/本の場合の配置形状別の木材搬出経費を試算した。図-4.3より、両者の経費の差は64 haのシステム1では141円/m³、システム2では190円/m³、400 haのシステム1では340円/m³、システム2では402円/m³となり、面積の増加に伴って、差は大きくなるが、作業システムによる違いはほとんどない。立木によらず、木材搬出経費の差は作業システムごとで同じであることから、総コストの安い1.0 m³/本の方が配置形状の影響を受ける。しかし、非合理的な路網の総

コストに対する配置形状による削減費は数%と小さい。また、合理的な路網は実際には考えられないため、配置形状による木材搬出経費の削減効果はより小さくなり、配置形状が木材搬出経費に与える影響はほとんどない。このことから、最長平均搬出距離と最短平均搬出距離の距離の差はあるものの、経費に影響がある程の距離の差ではないことが明らかとなった。

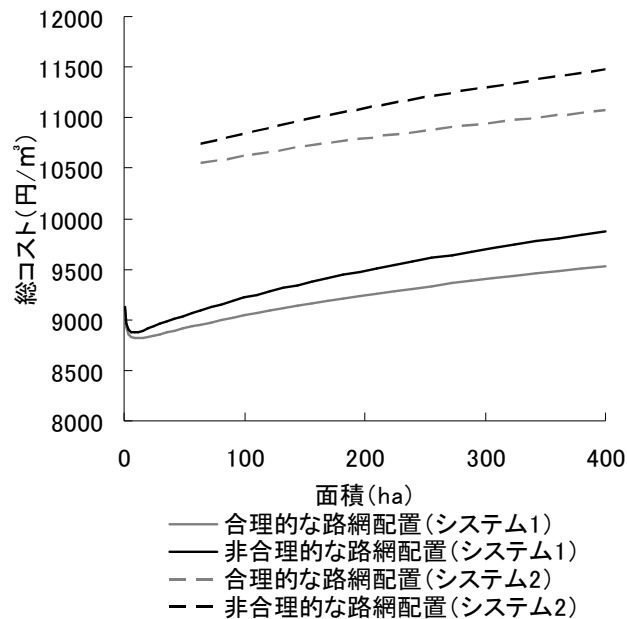


図-4.3 路網配置別の面積と木材搬出経費との関係

左図：0.3 m³/本，右図：1.0 m³/本

4.4 路網開設・維持費が経費に与える影響

本章では、1時間あたりの作業道作設経費 C_c を 6020 円/時、1mあたりの作設時間 T_c を 320.5 秒/m、すなわち 1m あたりの開設費を 536 円/m と設定して分析をした。その結果、経費が安いのは 0.3 m³/本ではシステム 1 で、1.0 m³/本ではシステム 2 であることが明らかになった。しかし、丸太 1m³あたりの作業道開設費は地質や工法によって大きく変化するため、丸太 1m³あたりの作業道開設費によっては、木材搬出経費が変化し、経費の安いシステムが変わる可能性が考えられる。

そこで、ここでは 1m あたりの作業道開設費と各システムの作業道開設費の差 (円/m³) との関係を明らかにし、木材搬出経費の安いシステムが入れ替わる 1m あたりの作業道開設費の境界値を明らかにする。ただし、システム 1 はシステム 2 より、高密な路網が必要となるため、システム 2 の経費の方が安くなっている 1.0 m³/本では、1m あたりの作業道開設費に関わらず、システム 2 の経費の方が必ず安

い。したがって、ここでは $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ の場合のみ分析する。面積ごとに路網密度は異なるため、 1m あたりの作業道開設費と各システムの作業道開設費の差との関係は面積ごとで異なるものの、ここではその一例として 400 ha での 1m あたりの作業道開設費と各システムの作業道開設費の差との関係を図-4.4 に示す。 400 ha でのシステム 1 とシステム 2 との経費の差は $1543 \text{ 円}/\text{m}^3$ であることから、 $1543 \text{ 円}/\text{m}^3$ となる 1m あたりの作業道開設費は $1682 \text{ 円}/\text{m}$ となる。したがって、 $1682 \text{ 円}/\text{m}$ を境に、それより高い作業道開設費であれば、システム 2 の方が安くなり、それ安ければシステム 1 が安くなることが分かる。このように面積ごとに算出した木材搬出経費の安いシステムが入れ替わる境界値を図-4.5 に示す。図-4.5 より、 64 ha 以下はシステム 2 が導入できないため、 1m あたりの作業道開設費に関係なく、システム 1 が導入されるが、それより面積が大きい場合、 1m あたりの作業道開設費 $1600\sim 1800 \text{ 円}/\text{m}$ を境にそれより安ければ、システム 1 が最適であり、それより高ければ、システム 2 が最適であることが分かった。

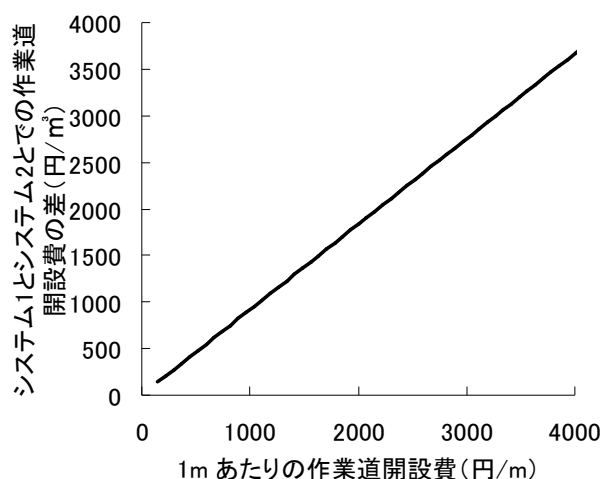


図-4.4 400 ha での 1m あたりの作業道開設費と各システムの作業道開設費の差

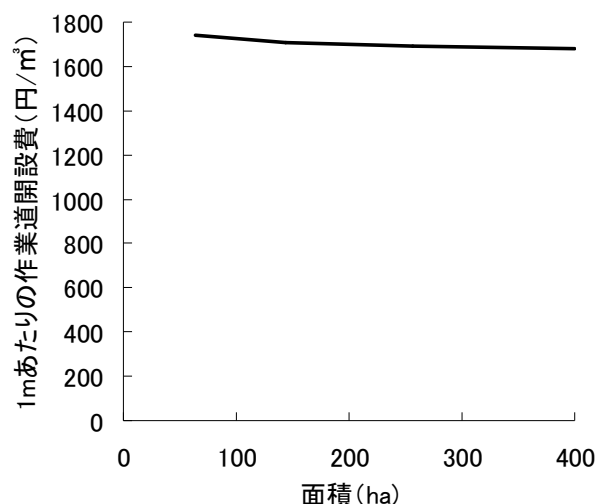


図-4.5 面積と木材搬出経費の安いシステムが入れ替わる境界値との関係

4.5 まとめ

異なる2つの立木サイズで分岐や循環のある路網での車両系システムの経費を試算した結果、 $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ 本ではシステム1が安いのに対し、 $1.0 \text{ m}^3/\text{本}$ 本ではシステム2が安くなった。また、 $0.3 \text{ m}^3/\text{本}$ 本では1 mあたりの作業道開設費1600~1800円/mで最少経費となる作業システムが替わる値であり、それより1 mあたりの作業道開設費が大きいと、システム2の方が安くなることを明らかにした。これまでは配置形状によって平均搬出距離がどの程度、変わるかは明らかでなかったが、第三章で配置形状によって変わる平均搬出距離の変動する範囲が明らかとなった。しかし、この距離の差を経費として試算すると、かなり小さく、配置形状が木材搬出経費に与える影響はほとんどないことを明らかにした。このことから、分岐や循環のある路網において、木材搬出経費を算出する場合、配置形状を考慮する必要がない。すなわち、森林作業道の設計において、経験の浅い技術者は平均搬出距離を考える必要はなく、その現場に適した作業システムを選択し、そのシステムに合った木寄せ距離になるように路網を配置すればよいことが分かった。以上から、森林作業道の路網は使用する木寄せ機械に適した道路間隔に配置すればよく、森林作業道を作設できる地点や作設できない地点の選定条件を明らかにすれば、経験の浅い技術者でも容易に森林作業道の設計ができるようになる。

本研究では作業道維持費を算出する計算式が構築されていなかったことから、作業道維持費を木材搬出経費に含めないで、分析を行った。しかし、システム1とシステム2とでは、路網密度が異なるため、維持費も異なると考えられる。そのため、今後の課題としては、作業道維持費を含めた場合での最適な作業システムを明らかにする必要がある。また、1mあたりの作設時間 T_c (秒/m)と1時間あたりの作

業道作設経費 C_c (円/時) との関係が明らかになっていないため、本研究では、木材搬出経費の安いシステムが入れ替わる 1m あたりの作業道開設費の境界値の算出にあたり、1mあたりの作設時間 T_c (秒/m) は 1 時間あたりの作業道作設経費 C_c (円/時) に関わらず、一定と仮定した。しかし、実際は一定でない可能性も考えられる。そのため、1mあたりの作設時間 T_c (秒/m) と 1 時間あたりの作業道作設経費 C_c (円/時) との関係を明らかにし、それを含めた場合での最適な作業システムを明らかにする必要がある。

5章 開設地の選定条件の明確化に対するラフ集合理論の適用可能性

5.1 はじめに

本研究の目的は、経験的知識が必要とされる作業効率の高い配置形状を明らかにすることと崩壊しない最適な開設地の選定条件の明確化を行うことである。第二章、第三章、第四章では作業効率の高い配置形状の検討を行った。この結果から、平均搬出距離が短い配置形状は幹線が支線の midpoint を通ることであり、配置形状別に木材搬出経費を算出できるようになった。しかし、このような配置形状を現地において、設計するには、安全に開設できる地形を選択し、開設できない地形を避ける必要がある。熟練技術者は、そのような地形を長年の経験から培った経験的知識から見分けているが、この経験的知識は曖昧な部分が多く、後進への伝達が困難である。このことから、第五章、第六章、第七章では経験的知識によって行われている森林作業道の開設地の選定条件を明確にする。

経験的知識によって作設した実際の森林作業道開設地点の地形的特徴から、崩壊しない開設地点を明らかにする研究が、これまで行われてきた（鈴木ら 2007, 梅田ら 2007）。これらの研究では地形的特徴を地形因子ごとに分析し、各地形因子での地形的特徴を明らかにしている。しかし、各技術者（大橋ら 2007, 田邊ら 2007）によると、開設地の選定は複数の地形の組み合わせを用いて行われているため、崩壊しない開設地点の地形条件を明確にするには複数の地形因子の組み合わせを用いて、分析する必要がある。そのような複数の因子から、対象現象を生じさせるのに有効な因子のみを取り出すことによって、その現象を生じさせる最小限の条件（ルール）を抽出するラフ集合理論という手法がある。このラフ集合理論は感性工学（榎本ら 2007, 田辺ら 2007）の分野では用いられているが、自然状態から人間の経験を活かして作設された森林作業道といった人工物への適用事例はこれまでない。

そこで、本章ではラフ集合理論を用いて経験的知識によって行われている森林作業道の開設地の選定の明確化にあたり、このラフ集合理論が適用できるかを明らかにすることを目的とする。そのために、ラフ集合理論で得られた条件（ルール）によって、どの程度、森林作業道の開設地を判別できるかを示す判別割合を算出し、その指標を用いてこの手法の適用可能性の評価を行った。

5.2 対象地の概要

まず、森林作業道の特徴として、長期間利用でき、開設・維持が低コストであることが挙げられることから、以下の6つの条件をすべて満たした森林作業道を対象として選択した。

- (1) 経験的知識を活用して作設されていること
- (2) 長期間利用していること

- (3) 低コストで開設・維持されていること
- (4) 高密であること
- (5) 作業路網が発展段階ではなく既に完成していること
- (6) 堀ら（1989）の三角座標地形分類で車両系に分類されていないこと

ここで、(5)において作業路網が発展段階の地域を除いたのは、完成していない状態と完成状態とでは、抽出されるルールが異なる可能性があると考えたためであり、(6)で車両系に分類された地域を除くのは、森林作業道を設計するにあたり、車両系に分類される地域は基本的に傾斜が緩く、地形による制約が少ないと考えたためである。これらの6つの条件を満たす森林作業道を、設計者や利用年数、路網密度、作業道の配置などから判断し、高知県四万十町町有林の6か所（轟山、井ノ谷山、重木山、キビジリ、ゴシヨの森、宮ノ谷）、秋田県湯沢市私有林の2か所（滝向、落合）、群馬県安中市私有林の1か所（松井田）、大阪府千早赤阪村私有林の1か所（葛城山）、三重県大紀町私有林の1か所（大紀）、奈良県上北山村私有林の1か所（西原）の6地域12か所を分析対象の森林作業道とする（表-5.1、図-5.1～5.12）。対象地の概況は表-5.1に示したとおり、各対象地の面積は18～197 haと200 haに満たない小規模な団地で、路網密度はキビジリ、ゴシヨの森、宮ノ谷では70～100 m/ha、それ以外の地域は180～240 m/haと高密である。作業システムは、対象地の傾斜の分布形から最適な作業システムを推定する堀ら（1989）の三角座標地形分類によると、四万十町の6か所（轟山、井ノ谷山、重木山、キビジリ、ゴシヨの森、宮ノ谷）、葛城山、西原の計8か所で架線系、湯沢市の2か所（滝向、落合）、松井田、大紀の計5か所で混合系が最適な作業システムと示されたが、実際はどの地域も集材に関しては、ウインチ付グラップルで、運材に関しては葛城山、西原ではトラックで、その他の地域では林内作業車またはフォワーダで行う車両系システムである。ただし、西原は場合によって、架線やヘリコプターによる集材（架線系システム）も行っている。各対象地の伐採林分および伐採施業は、四万十町では50年生のヒノキを、湯沢市では40年生以上のスギを、大紀では35～40年生のスギを、葛城山では20～70年生のスギとヒノキを、西原では70～135年生のスギとヒノキを対象に間伐施業を行っている。また、松井田では30～40年生のスギを対象に保育間伐を行っている。土質は、四万十町では中生代白亜紀の堆積岩（砂岩、頁岩互層）、湯沢市では新第三系三途川層（シルト岩、砂岩、凝灰岩互層）、松井田では新生代の火山砕屑物、降下堆積物である（鈴木ら 2007）。葛城山では領家変成帯（花崗岩類）、西原では中生代白亜紀の四万十累帯（砂岩と礫岩の互層）、大紀では中生代白亜紀の四万十累帯（泥質岩）である（中沢ら 1987）。

表-5.1 対象地の概要

対象地	面積 (ha)	路網密度 (m/ha)	傾斜 (度)	地形指数による作 業システム	用いられる搬出システム		
					集材	運材	
高知県	轟山	24.3	233.8	31.1	架線系	ウインチ付 グラップル	林内作業車
	井ノ谷山	17.9	228.6	32	架線系		
	重木山	38.2	241.4	31.4	架線系		
	キビジリ	42.3	96.3	32.2	架線系		
	ゴシヨの森	32.5	99.6	31	架線系		
秋田県	宮ノ谷	143.8	76.5	28.9	架線系	同上	フォワーダ
	滝向	25.3	239.3	25.3	混合系		
	落合	23.4	239.8	25.2	混合系		
群馬県	松井田	31.4	181.5	22.5	混合系	同上	林内作業車
大阪府	葛城山	82.9	205.7	27.6	架線系	同上	トラック
三重県	大紀	96.4	76.9	25.6	混合系	同上	フォワーダ
奈良県	西原	196.6	192	32.3	架線系	同上	トラック

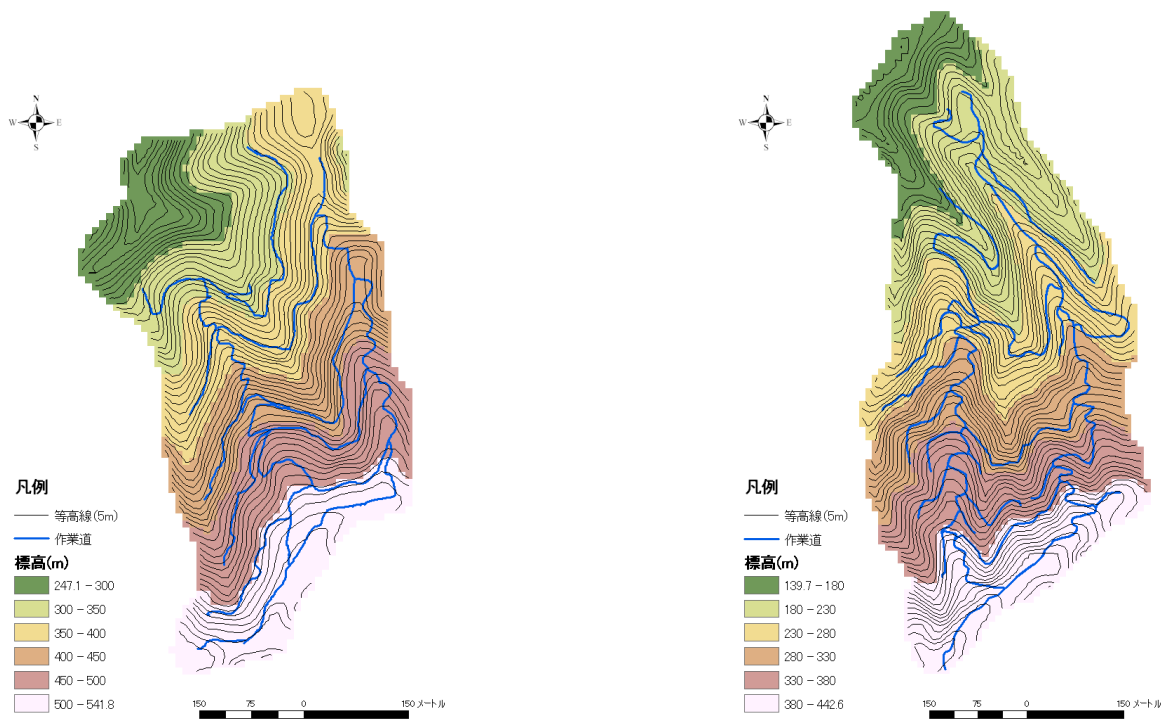


図-5.1 対象地(轟山)の路網の平面図

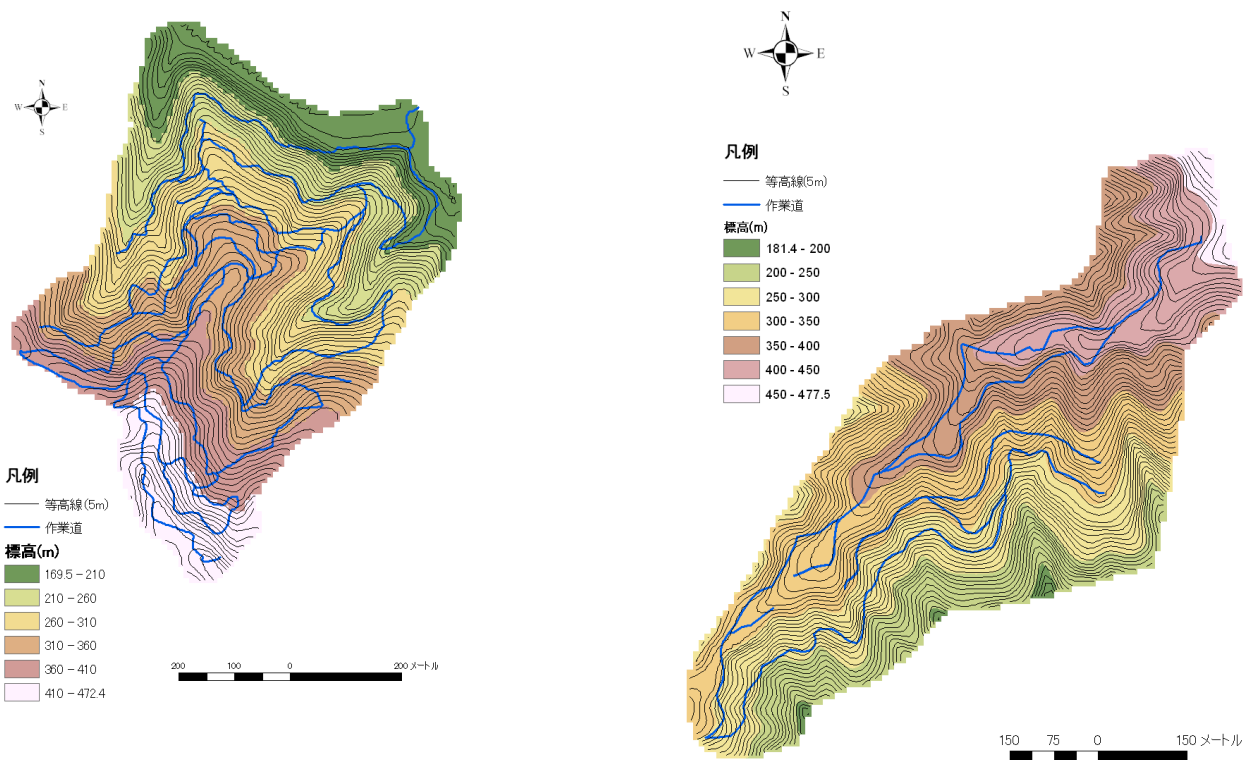


図-5.3 対象地(重木山)の路網の平面図

図-5.4 対象地(キビジリ)の路網の平面図

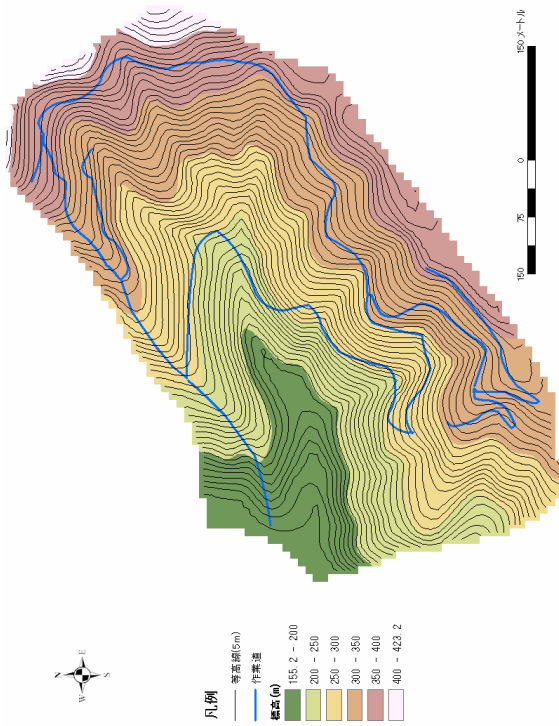


図-5.5 対象地(ゴシヨの森)の路網の平面図

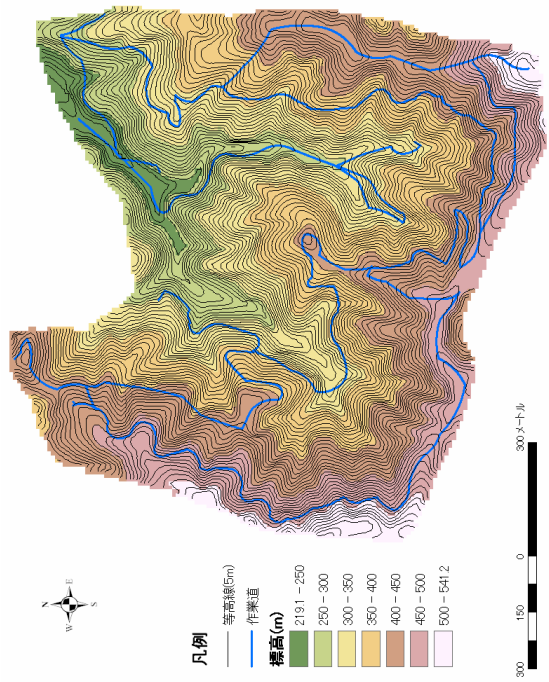


図-5.6 対象地(宮ノ谷)の路網の平面図

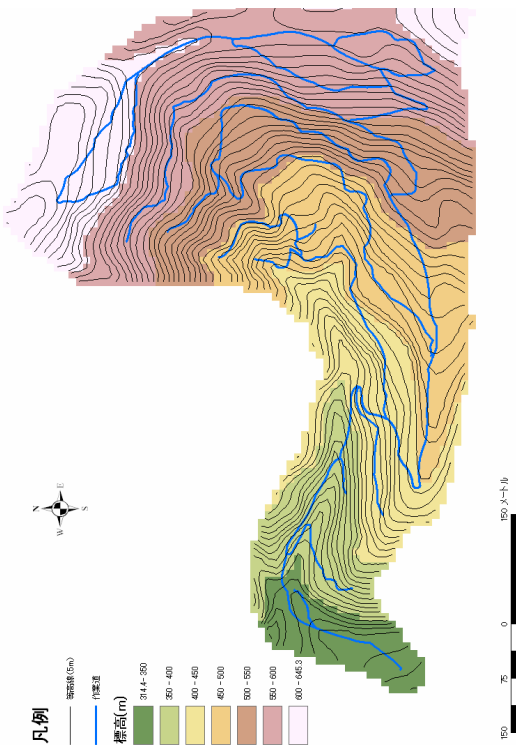


図-5.7 対象地(滝向)の路網の平面図

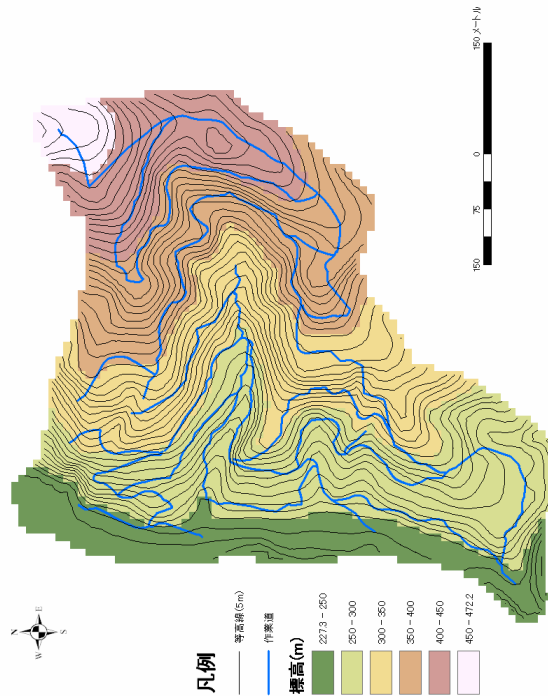


図-5.8 対象地(落合)の路網の平面図

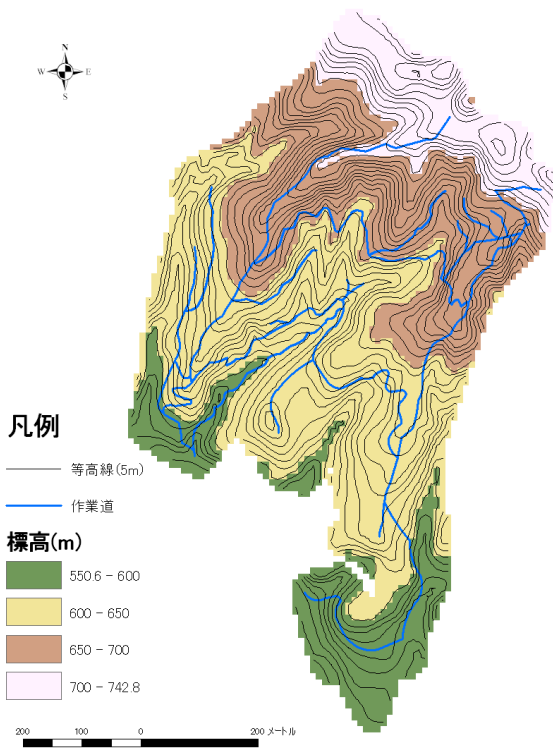


図-5.9 対象地(松井田)の路網の平面図

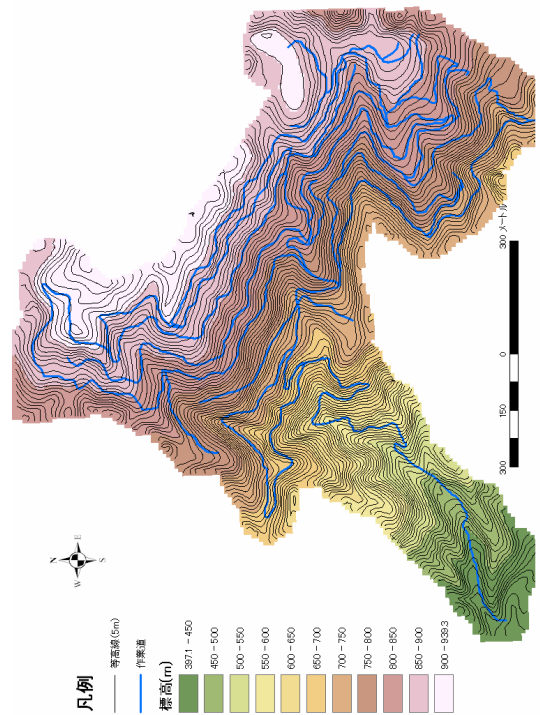


図-5.10 対象地(葛城山)の路網の平面図

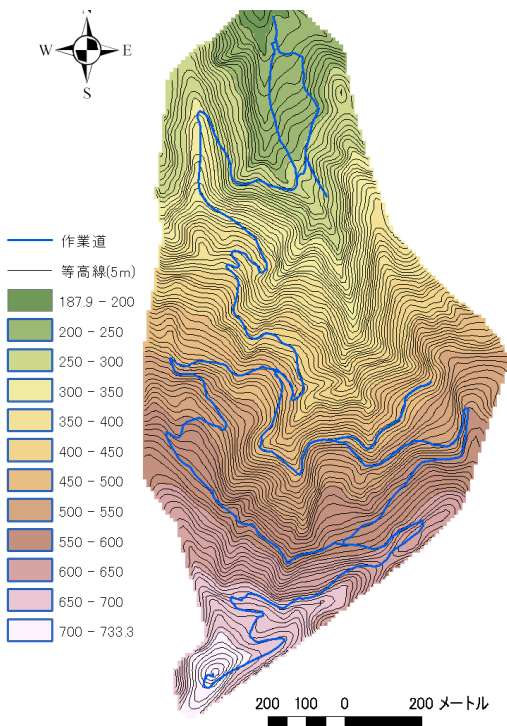


図-5.11 対象地(大紀)の路網の平面図

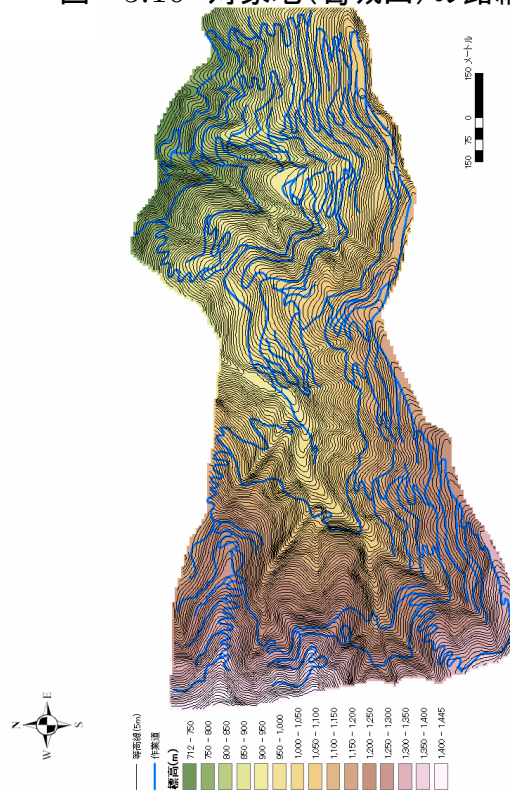


図-5.12 対象地(西原)の路網の平面図

5.3 ラフ集合理論の概要

5.3.1 ラフ集合理論の概念

ラフ集合理論は 1982 年に Z.Pawlek (1982) によって提唱された。この手法は、様々な属性の組み合わせで生じる現象を、属性ごとに「類別」していき、その現象に関っていない不要な属性を取り除くことで、その現象を発生させる（または発生しない）最小限必要な条件（ルール）を抽出する方法である。これは、感性工学（榎本ら 2007, 田辺ら 2007）の分野や山地崩壊や土石流の発生の条件の明確化（広兼ら 1997, 岡本ら 2002, 奥原ら 2004）などに利用されており、非線形分析であるため線形分析である数量化理論Ⅰ類、Ⅱ類や判別分析で問題として挙げられている、説明変数の独立性（多重性の問題）を考慮しなくてすむことと、サンプル数と変数に制限がないという特徴を持つ分析方法である。

まず、ラフ集合の概念を図-5.13 に示す。図-5.13 における大きな四角形は作業道の有無を表した集合であり、その四角形の内部の黒点が作業道ありを示し、白点が作業道なしを示すデータである。図-5.13 における四角形の集合は、それぞれ 3 つのカテゴリーを持つ属性Ⅰと属性Ⅱで構成されており、それぞれのカテゴリーにより 9 つに区分された領域がある。この 9 つの領域に作業道の有無データは「類別」され、属性Ⅰが 1 かつ属性Ⅱが 3 の集合には作業道ありのデータとなしのデータとが混在しており、属性Ⅰが 1 かつ属性Ⅱが 2 の集合や属性Ⅰが 3 かつ属性Ⅱが 1 の集合にはどちらかのみが存在する領域がある。属性ⅠとⅡを用いて、作業道の有無を区別すると、作業道の有無データのどちらかのみが存在している領域では作業道の有無を区別できるが、両方が混在している領域ではそれらを区別できない。このように属性Ⅰと属性Ⅱのカテゴリーの組み合わせだけでは、作業道の有無を区別できないデータの部分集合をラフ集合という。ラフ集合を減少させるには、図-5.14 に示すように、属性数を増やすことで可能になる。図-5.14 では新たに属性Ⅲとして、4 本の斜線が入ることで、図-5.13 と比較して、より細分化された 26 個の領域ができ、ラフ集合にあるデータ数（作業道ありと作業道なしの 2 種類が混在している領域のデータ数）は図-5.13 では 10 個、図-5.14 では 4 個と、属性数が増えることでラフ集合にあった 6 個のデータは同一の要素のみが存在する領域になったことが分かる。

次に、ラフ集合理論から抽出されるルールについて説明する。ラフ集合理論で抽出されるルールは、現象の発生・非発生（図-5.13 では、作業道の有無）と各属性のカテゴリーの組み合わせとを「If a then b 」の形で表現するものである。 a は条件部、 b は結論部を意味し、 a の部分に条件部に関する属性のカテゴリーの組み合わせが、 b の部分に現象に関する属性が当てはまる。ここで、条件部 a に該当するデータの集合を A 、結論部 b に該当するデータの集合を B とすると、それらの集合はルールに該当する積集合 ($A \cap B$)、条件部には該当するが結論部には該当しない差集合 i ($A - B$)、結論部には該当す

るが条件部には該当しない差集合 i ($A - B$) の 3 種類に分割でき、積集合 ($A \cap B$) を整合領域、差集合 i ($A - B$) を誤判別領域、差集合 ii ($B - A$) を未判別領域 (図-5.14) とすると、整合領域、誤判別領域、未判別領域にあるデータ数はルールによって異なる。例えば、図-5.13 において、「If 属性 I = 3 then 作業道なし」という作業道なしのルールには、集合 A には 9 つのデータがあり、集合 B には 13 個のデータがある。そのなかで 6 つが整合領域のデータで、3 つが誤判別領域のデータ、7 つが未判別領域のデータとなる。一方、「If 属性 I = 2 And 属性 II = 2 then 作業道なし」という作業道なしのルールには、集合 A には 2 つのデータがあり、集合 B には 13 個のデータがある。そのなかで 2 つが整合領域のデータで、誤判別領域のデータはなく、11 個が未判別領域のデータとなる。前者は整合領域と誤判別領域ともにデータのあるルールとなり、後者は整合領域にあるデータは少ないが、誤判別領域にあるデータはないルールとなる。このように、ルールによってそれぞれの領域のデータ数が異なる。そのため、それぞれのルールを評価するには、ルールの有効性を示す指標が必要となる。その指標として、ルールの精度 (正解率) を示す確信度と、ルールの汎用性 (ルールに該当するデータ数の多さ) を示す C.I. をそれぞれ、(5.1) 式、(5.2) 式に定義する。

$$\text{確信度} = \frac{\text{Card}[A \cap B]}{\text{Card}[A]} \quad (5.1)$$

$$C.I. = \frac{\text{Card}[A \cap B]}{\text{Card}[B]} \quad (5.2)$$

ここで $\text{card}[]$ は集合の要素数を表す。例えば、図-5.13 における、「If 属性 I = 1 And 属性 II = 2 then 作業道あり」という作業道ありのルールでは、確信度は 1.00 (3/3)、C.I. は 0.25 (3/12) となる。すなわち、このルールに該当するデータはすべて「作業道あり」であり、このルールは作業道ありのデータの 25% を判別できる評価になる。この確信度と C.I. で各ルールを評価し、確信度と C.I. が高く、またルールの構造が容易である、すなわち属性数が少ないルールをラフ集合理論では基本的に抽出していく。しかし、一般的に確信度と C.I. がともに大きいルール、すなわちルールの精度が大きく、汎用度も高いルールは少なく、一方が大きいと他方は小さくなる (田中ら 1994) ことから、本研究では可変精度ラフ集合モデルの β の下近似手法 (津本ら 1994) に従って、確信度にしきい値を設定し、そのしきい値以上であったルールを抽出する方法を用いて分析を行う。

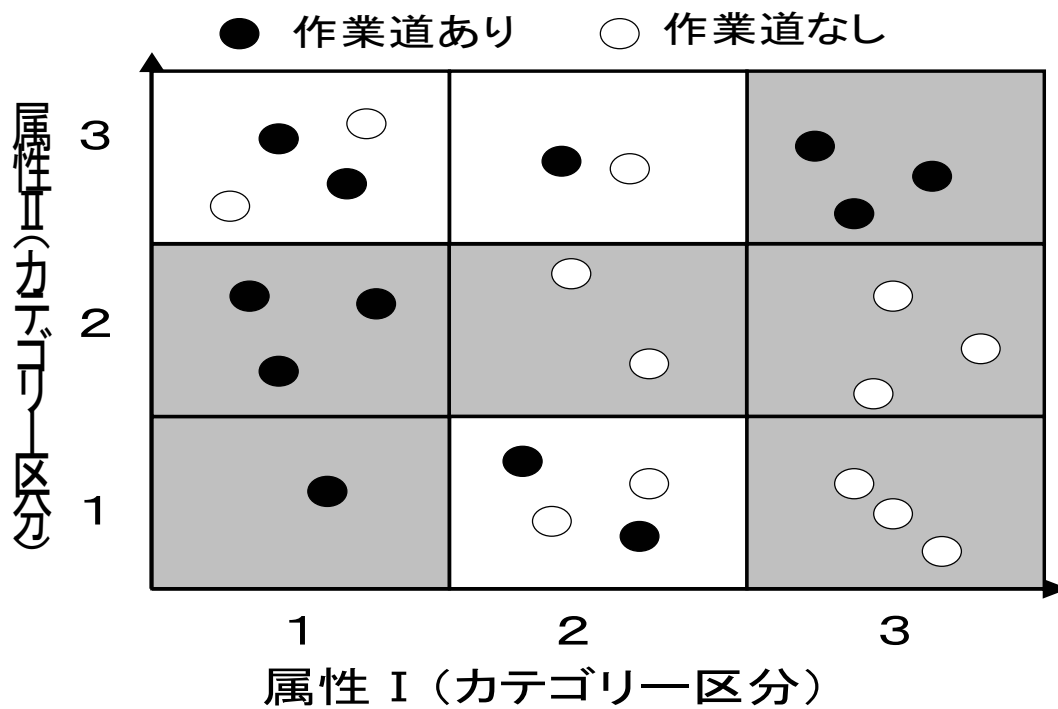


図-5.13 ラフ集合の概念図

図中の白い領域がラフ集合となる。

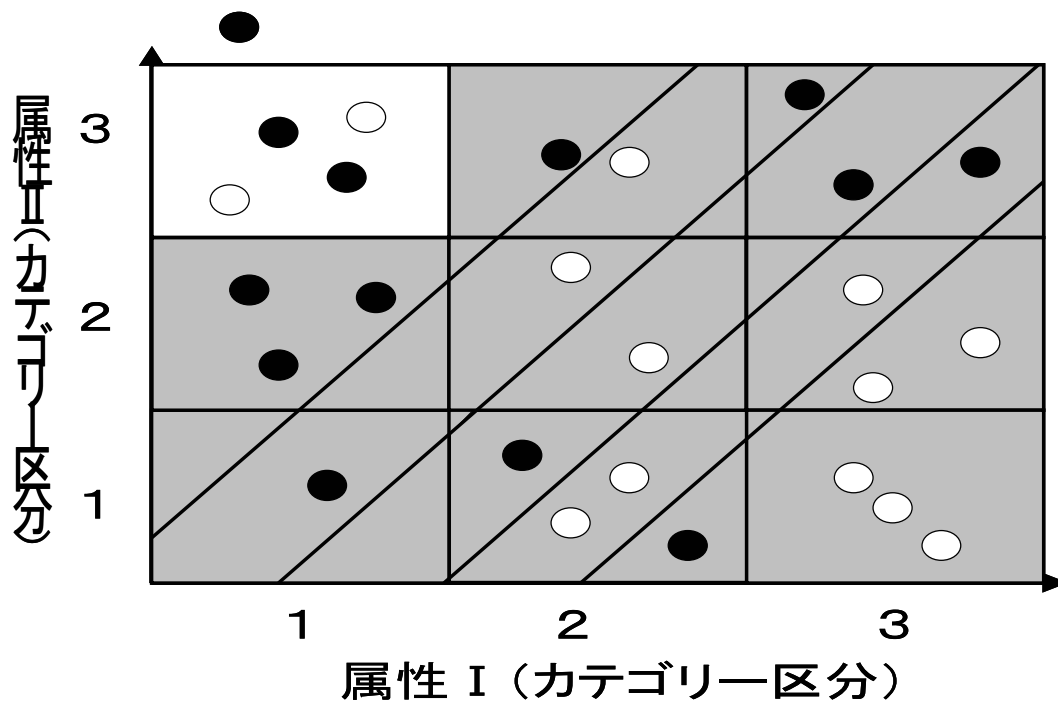


図-5.14 属性数を増やした場合のラフ集合

斜線は新たに加えた属性 III (カテゴリー区分) とする。

また、図中の白い領域がラフ集合となる。

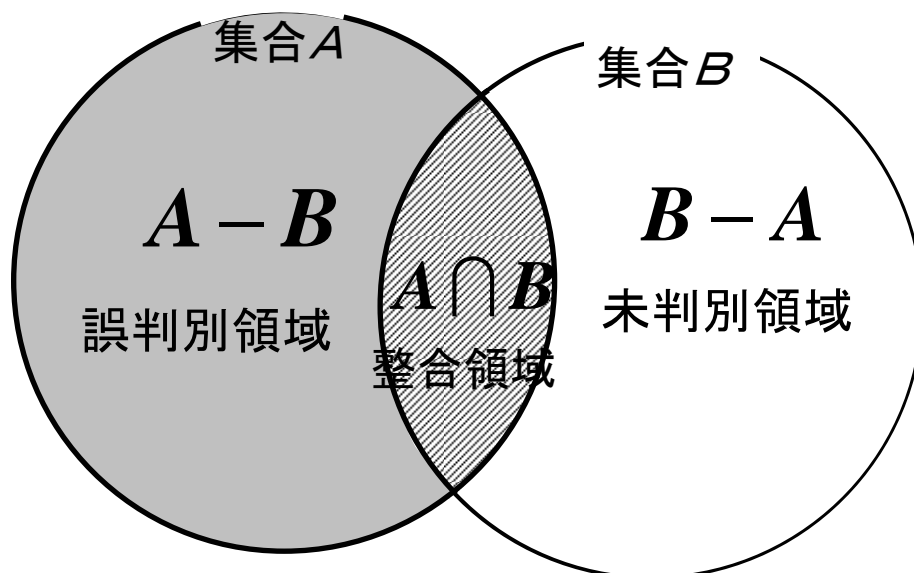


図-5.14 条件部に該当する集合Aと結論部に該当する集合Bとの関係

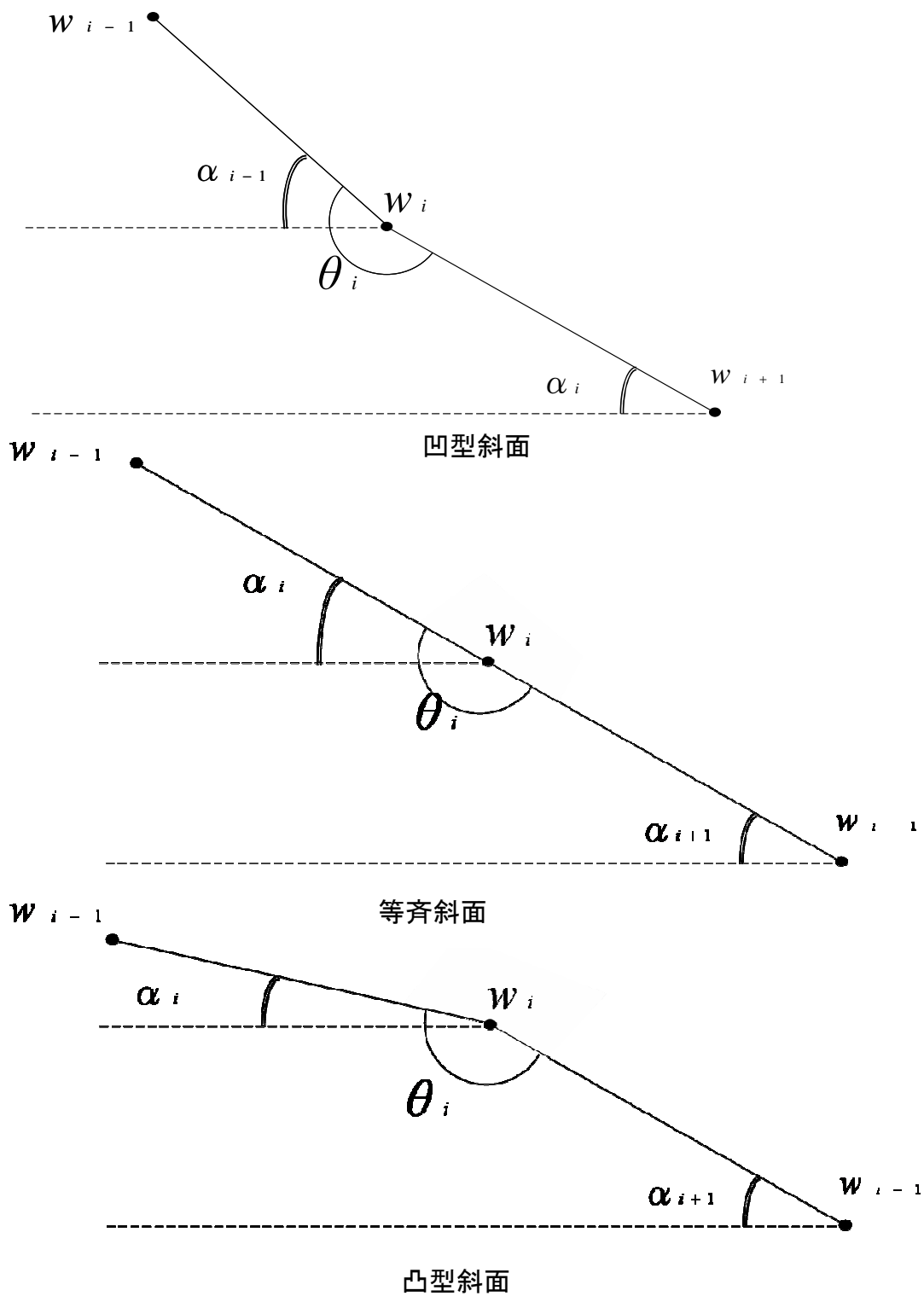
5.3.2 条件部に関する属性の決定

経験的知識の解説書（大橋ら 1989, 大橋ら 2007, 田邊ら 2007）によると，開設地の選定は傾斜やタナ地形，尾根や谷，堆積地，地下水が流出する地点などの様々な地形因子を考慮している。そこで，本研究では熟練の技術者が選定に用いている各地形に該当する地形因子を設定し，その因子を用いて分析する。その地形因子は，それぞれ解説書で示している傾斜では斜面の平均傾斜（度），タナ地形は凸型斜面と考え，斜面の鉛直形状（度）を用いる。尾根や谷では斜面の水平形状（度），堆積地形では崖錐，地下水が流出する地点では0次谷と設定する。さらにこれらに斜面下部の傾斜と過去の崩壊を加えた7種類をラフ集合理論に適用する。

平均傾斜，斜面の鉛直形状（度），水平形状（度），下部の傾斜（度）はArcGISを用いて10 mメッシュごとに算出し，崖錐，0次谷，過去の崩壊はArcGISを用いて，各地形に該当する地点を抽出し，その地点と重なるメッシュを各地形の属性地として与える。以下に各地形因子の算出方法を記す。

平均傾斜の算出方法は，ArcGISのエクステンションであるSpatial AnalystのSlope算出機能を用いて算出する。

斜面の鉛直形状の算出にあたり、斜面の鉛直形状の定義を確認する。斜面の鉛直形状とは、斜面の鉛直方向の断面の形状であり、その形状により、突出しているもの、直線であるもの、湾入しているものに分類でき、それぞれ凸型斜面、等斉斜面、凹型斜面と定義される（鈴木 1997）。そこで、本研究における斜面の鉛直形状は、落水線に沿って断面図を描き、斜面と斜面がなす鉛直面内の内角 θ を算出し、算出した内角 θ を水越ら(2000)の分類にしたがって、凸型斜面 ($175^\circ > \theta$)、等斉斜面 ($175^\circ \geq \theta \geq 185^\circ$)、凹型斜面 ($175^\circ < \theta$) とに分類（図-5.15）する。内角の算出方法は、以下のように行う。10 mDEMを用いて、各ポイントデータの最大傾斜方向を抽出する。抽出された最大傾斜方向に沿って、各ポイントをつなぐ形で落水線を発生させ、落水線上の連続する標高ポイント3点について、標高が高い方から順に w_{i-1} 、 w_i 、 w_{i+1} とする。線分 $w_{i-1} w_i$ と水平方向がなす角度を標高ポイント w_i の最大傾斜角 α_i 、線分 $w_i w_{i+1}$ と水平方向がなす角度を w_{i+1} の最大傾斜角 α_{i+1} とし、抽出した最大傾斜角 α_i と α_{i+1} との関係から、線分 $w_{i-1} w_i$ と線分 $w_i w_{i+1}$ とがなす鉛直面内の内角 θ_i を算出し、これを w_i の内角 θ_i とする。なお、最大傾斜方向の抽出には、ArcGIS のエクステンションである Spatial Analyst の Flow Direction 機能を用い、落水線の作成は ArcGIS のエクステンションである Spatial Analyst の Stream to Feature 機能を用いる。



(w_i は 10 m メッシュ数値地図の標高値, α_i は w_i の最急傾斜角)

図-5.15 斜面の鉛直形状の模式図

斜面の水平形状の算出にあたり、まず斜面の水平形状の定義を確認する。斜面の水平形状とは、斜面の水平方向の断面形状であり、その形状により、突出しているもの、直線であるもの、湾入しているものに分類でき、それぞれ尾根型斜面、直線斜面、谷型斜面と定義される（鈴木 1997）。この斜面形状の算出には、桜井らの最急勾配と接峰面図を用いた手法（2006）や伊里らの標高の1階導関数と2階導関数を用いた手法（1990）が挙げられるが、これらの手法は斜面の水平形状の線的な要素（稜線や水系網など）の抽出を目的しているため、経験的知識を身につけた熟練の技術者が判読する水平形状の面的な要素、つまり尾根や谷の拡がりまでは抽出できない。そこで、本研究では等高線の形状から斜面の水平形状の面的な要素を抽出する水越ら（2000）の方法を用いる。この手法は3つの処理からなっており、1つ目は等高線の頂点の抽出、2つ目は抽出した3点の頂点がなす山麓側の角度の算出である。その後、算出された山麓側の角度の値にしたがって、それぞれの斜面型に分類する。まず、等高線の頂点は、ArcGISの等高線作成ツールで作成された等高線を構成するポイント（図-5.16）の中から、1 m以内に近接するポイントを間引いて得られたポイントデータ（図-5.17）とする。ここで、間引き処理が必要なのは、ArcGISの等高線作成ツールで作成された等高線が極めて多くのポイントで構成されており、熟練の技術者が目視で判読する結果と異なるためである。この間引き処理はETGeo WizardsのGeneralizeツール（ETGeo Wizards 2009）で行った。なお、ここで用いた等高線は、ArcGISの等高線作成ツールで標高ラスタを用いて作成した5 m間隔の等高線であり、抽出されたポイントデータには位置座標（x, y座標）の他に標高値（z座標）が付加されている。次に山麓側の角度は、抽出した連続する3点の位置座標から算出する。山麓側の角度を算出するには、抽出した連続する3点のどちら側が山麓側かを判定する必要がある。そのためには、等高線（標高値 N ）上の連続する3点の頂点を順に n_{i-1} 、 n_i 、 n_{i+1} とした場合、それを順に結んだ線分と隣り合う等高線（標高値 $N+5$ 、 $N-5$ ）との相対的な位置関係が把握できればよい。そこで、本研究ではまず、 n_{i-1} を原点に、線分 $n_{i-1} n_{i+1}$ をx軸とした場合の頂点 n_i に最も近い、等高線（標高値 N ）より標高値が大きい頂点（標高値 $N+5$ ）と小さい頂点（標高値 $N-5$ ）をそれぞれ検索する。次に各検索された頂点のy座標から頂点 n_i のy座標を引いた値の正負を用いて、隣り合う等高線（標高値 $N+5$ 、 $N-5$ ）との相対的な位置関係を把握し、山麓側の角度を算出する。線分 $n_{i-1} n_{i+1}$ をx軸とすることで、頂点 n_i のy座標の正負と隣り合う等高線（標高値 $N+5$ 、 $N-5$ ）のy座標の正負の2種類の正負が得られる（図-5.18）。この正負の組合せによって、 n_{i-1} 、 n_i 、 n_{i+1} を順に結んだ線分のどちら側に標高が低いまたは高い等高線があるかを把握できる。ただし、この正負のうち、標高値 $N+5$ のy座標によるものと標高値 $N-5$ のy座標によるものは相互に異なる正負にならなければならないが、検索範囲が広いと正負が同じになる可能性がある。そのため、本研究では

検索範囲を n_{i-1} , n_{i+1} の x 座標の範囲内 (図-5.19) と設定して、検索を行った。当然、検索範囲が制限されるため、標高値 $N+5$ と標高値 $N-5$ の両頂点が検索されない場合がある。その場合は検索する標高値を変更 (標高値 $N+10$, 標高値 $N-10$ …) させ、どちらかの頂点が検索されるまで行う。この正負の組み合わせから、頂点 n_i の山麓側の角度 d_i を決定し、これの頂点 n_i を包含している 10 m メッシュの属性値として与える。そして、この属性値を水越らの分類 (水越 2000) にしたがって、谷型斜面を $d_i < 170^\circ$, 直線斜面を $170^\circ \leq d_i \leq 190^\circ$, 尾根型斜面を $190^\circ < d_i$ に分類して、斜面の水平形状を抽出する。

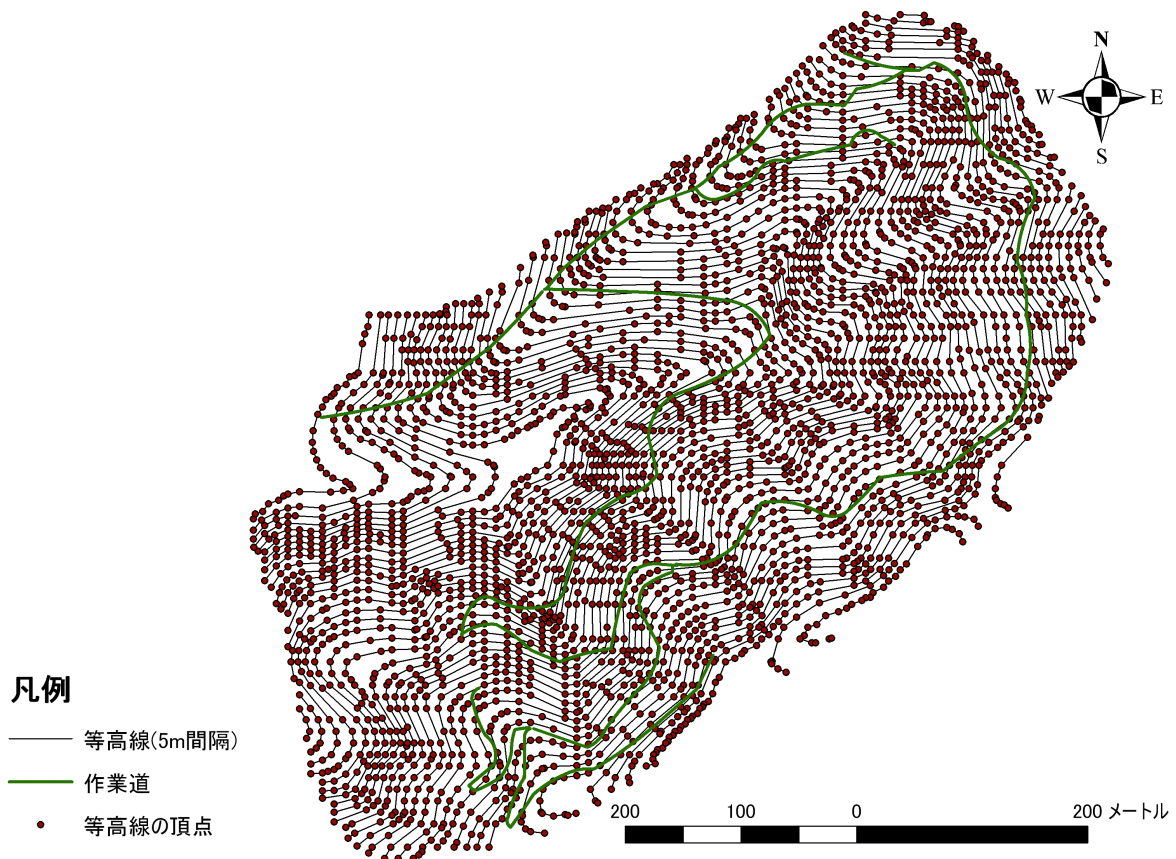


図-5.16 等高線の頂点(ゴシヨの森)

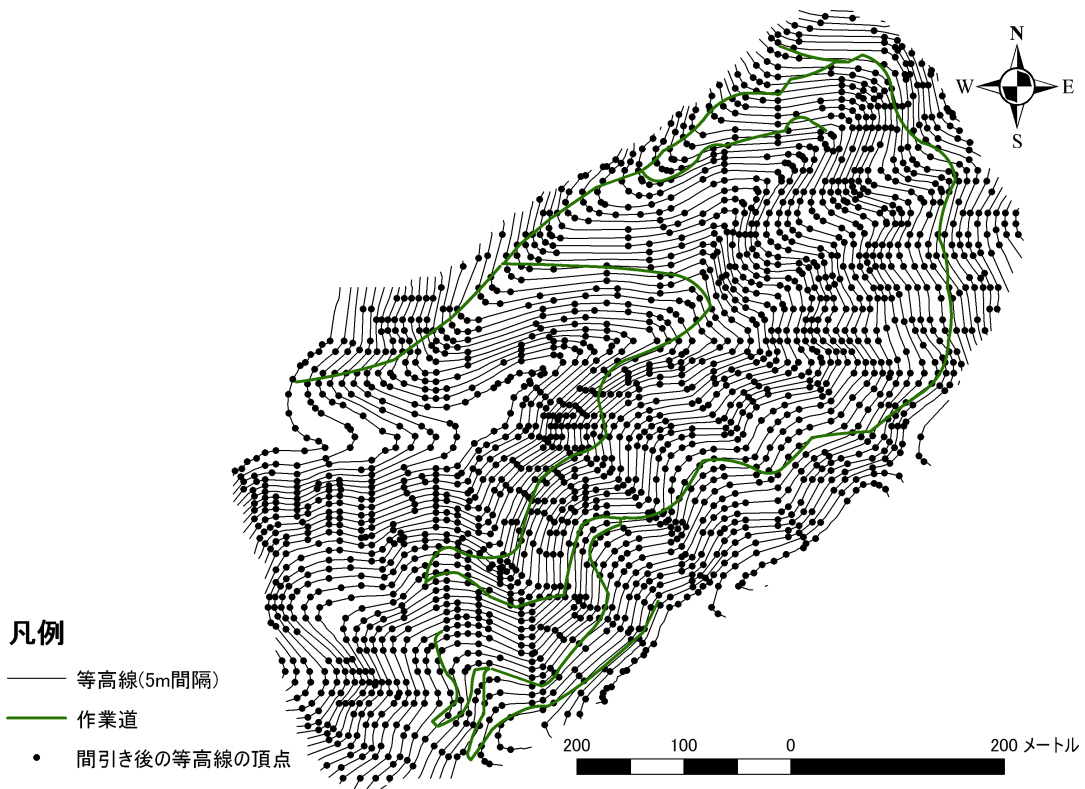


図-5.17 1 m 以内にある頂点の間引き処理した等高線の頂点(ゴシヨの森)

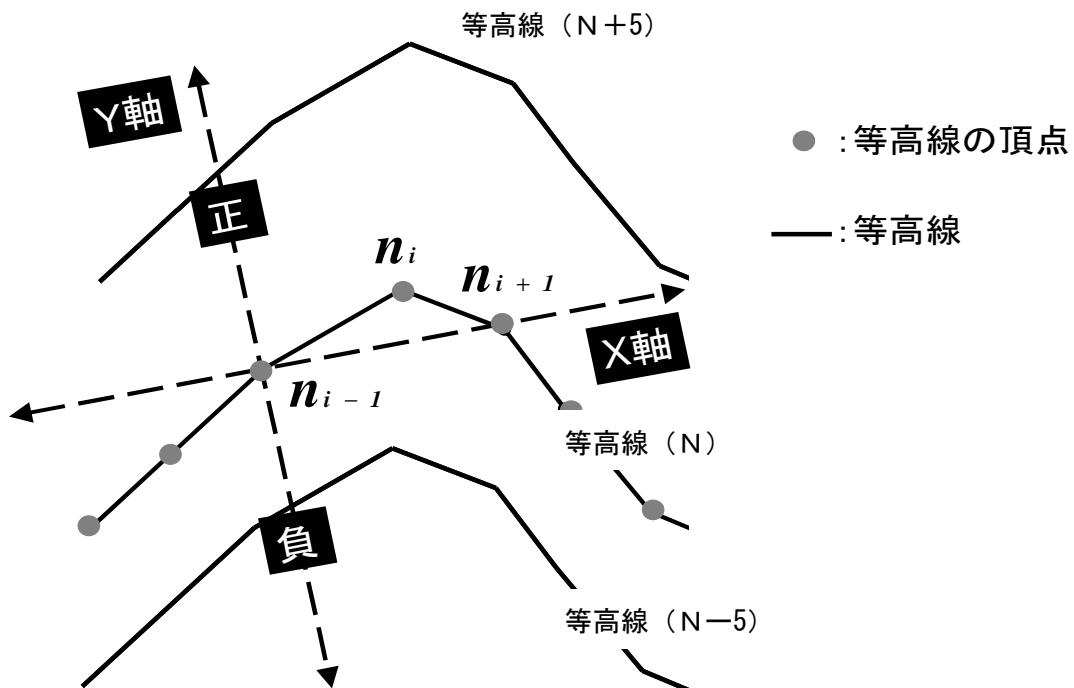


図-5.18 n_{i-1} , n_i , n_{i+1} を順に結んだ線分の曲がった方向の評価方法

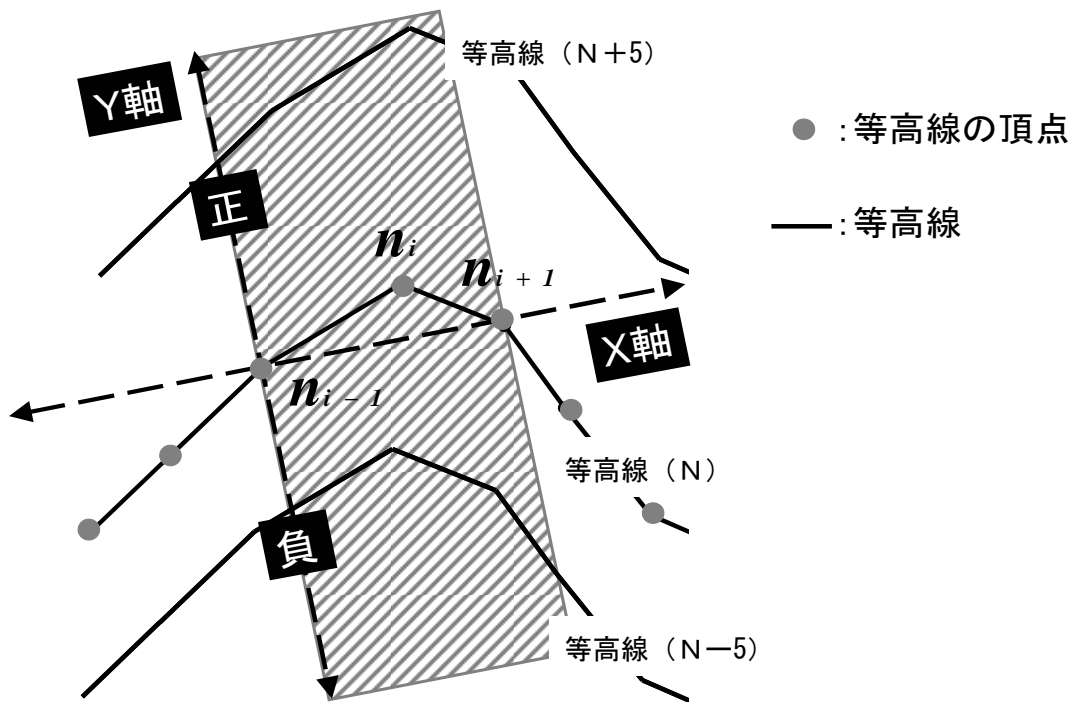


図-5.19 標高値が高いまたは低い頂点の検索範囲

崖錐とは図-5.20 で示されるような「急崖あるいは自由面から風化生産された岩屑がその基部に堆積して作った円錐状の堆積地形」(町田 1982) であり、その地形的特徴は、①同一方向に連続した斜面があること、②堆積している土砂の末端部の斜面の鉛直形状は凹型斜面であること、③末端部の傾斜角は安息角以下(含水率によって異なるが安息角はマサ土では 30~45 度、粘土では 40~45 度、砂では 30~45 度、砂利では 27~40 度である)が挙げられる(加藤 1956, 鈴木 2000)。これまで佐藤(1995)や渡辺(1993)は、このように定義された崖錐の抽出を試みており、本研究でもこれらの手法を用いて、抽出する。抽出にあたり、まず崖錐の 3 つある地形的特徴を、①は斜面方向に関する条件、②は斜面の鉛直形状に関する条件、③は傾斜に関する条件と置き換え、それら条件を満たす地形を崖錐として抽出する。この手法は落水線に沿った連続する 3 点を崖錐の抽出単位とし、その 3 点の標高が高い順から S_1 , S_2 , S_3 とし、各点に斜面方向に関する条件、斜面の鉛直形状に関する条件、傾斜に関する条件を適用させる。それぞれの条件は以下となる。斜面方向に関する条件は、その 3 点の斜面方向が同一であること、斜面の鉛直形状に関する条件は、 S_1 の鉛直形状は問わないが、 S_2 は凸型でなく、 S_3 は凹型であること、傾斜に関する条件は S_3 の傾斜が安息角以下で、 S_1 , S_2 は S_3 より急傾斜である。これらの条件を満たす 3 点を崖錐として抽出し、抽出した地点を包含する 10 m メッシュには「崖錐有」を、包含しな

い 10 m メッシュには「崖錐無」の情報を属性値として与える。ただし、 S_1 の鉛直形状が凸型の場合は、 S_1 は堆積部ではなく、土砂生産部であると考え、そのような場合は S_2 、 S_3 の 2 点のみ抽出する。なお、斜面方向の算出は、上述した ArcGIS のエクステンションである Spatial Analyst の Flow Direction 機能で行い、落水線は ArcGIS のエクステンションである Spatial Analyst の Stream to Feature 機能で作成する。斜面の鉛直形状および傾斜は 10 m メッシュごとに算出した斜面の鉛直形状および平均傾斜の値を用いた。

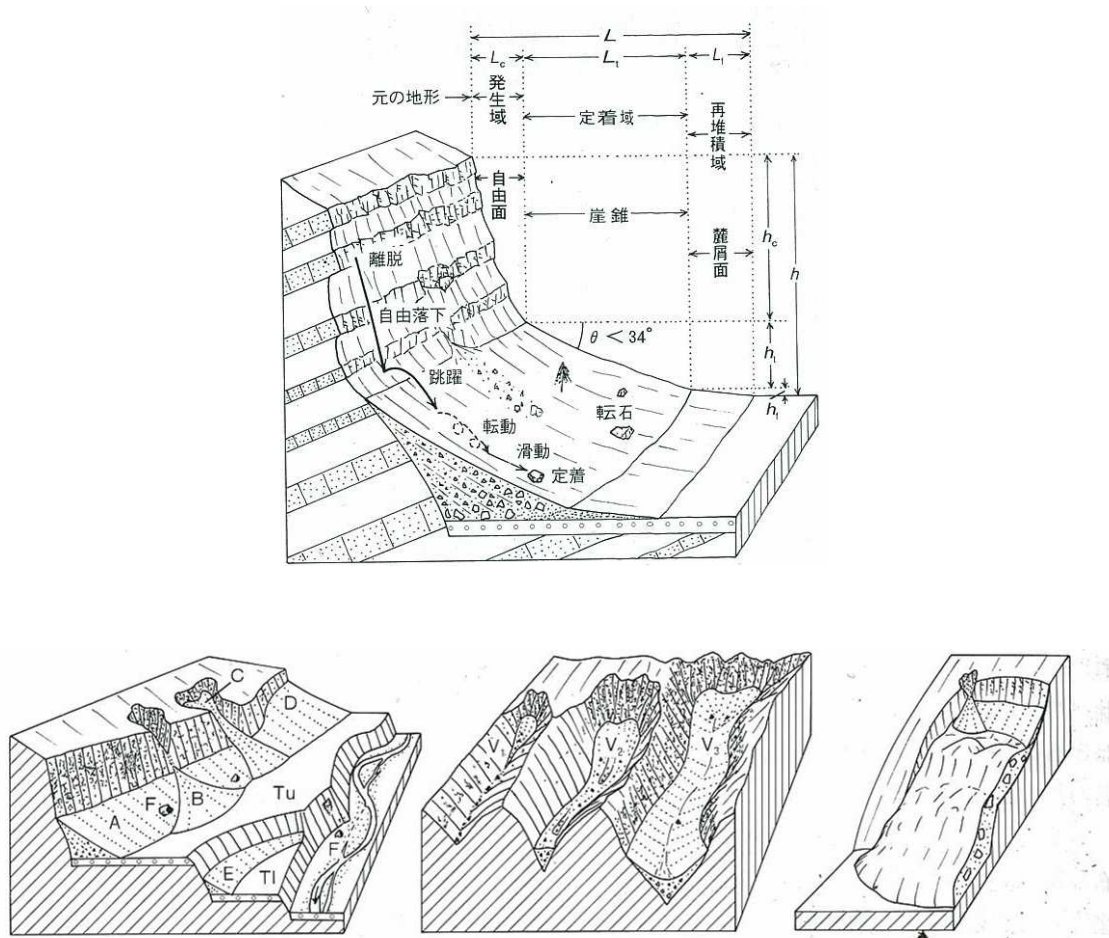


図-5.20 崖錐の模式図

鈴木隆介（2000）から引用

0次谷とは「1次水流の上流端から谷頭の谷型斜面」と定義（鈴木 2000）され、また国土交通省が作成した砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）では、0次谷の判読方法を「1/25,000 地形図あ

るいは大縮尺の地形図を使用して、等高線のくぼみ具合を眺めて、凹んでいる等高線郡の間口よりも奥行きが小なる地形とする」(国土交通省 2009)と定めている(図-5.21)。そのため、0次谷に関する研究(寺島 2001, 塚本 1973a, 1973b, 1973c, 1974)では、0次谷の判読は地形図を用いて目視で行っている。しかし、目視での判読は経験が必要であるため、本研究では谷型斜面の始まりである0次谷を、斜面の水平形状の抽出に用いた等高線の3点がなす角度が160度以上、170度以下と設定し、その条件に該当する地点を抽出した。抽出した地点を包含する10mメッシュには「0次谷有」、包含しない地形メッシュには「0次谷無」の情報を属性値として与えた。ただし、目視による0次谷の判読は巨視的であることから、水平形状で用いた頂点に対して、10m以内にある頂点を間引く処理をして得られた頂点を用いて判定する。間引き処理は、上述したETGeo WizardsのGeneralizeツール(ETGeo Wizards 2009)を用いた。

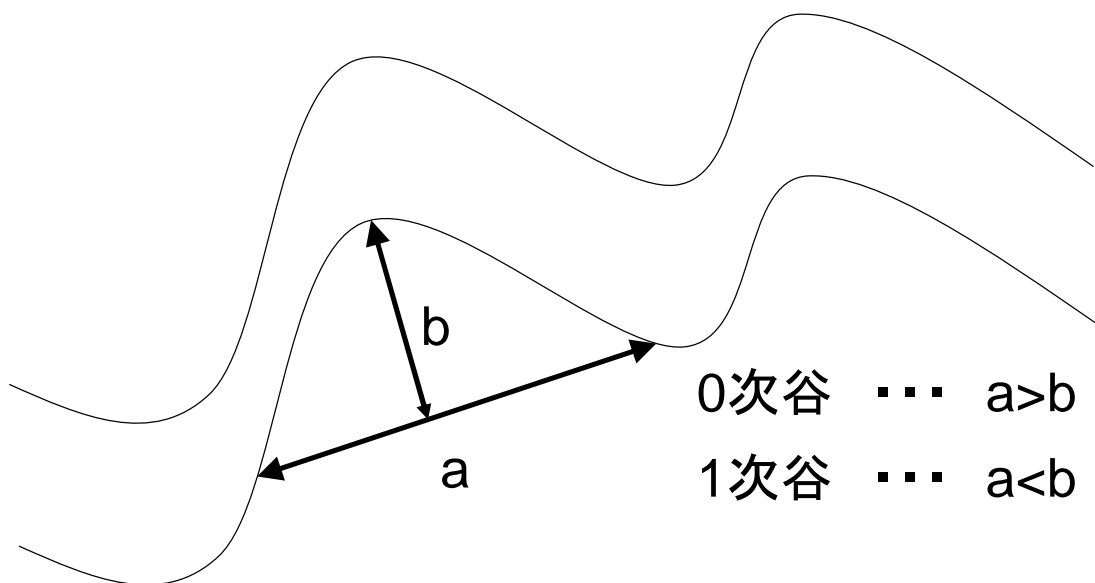


図-5.21 国土交通省による0次谷の判読方法

斜面下部の傾斜は、10mメッシュの周囲8メッシュにおいて、10mメッシュの最急傾斜方向の下方にあるメッシュの平均傾斜である。すなわち、斜面の鉛直形状の算出に用いた w_{i-1} 、 w_i 、 w_{i+1} において、 w_{i+1} を包含する10mメッシュの平均傾斜の値(図-5.22)となる。斜面下部の傾斜は、平均傾斜

および斜面の鉛直形状で用いた手法を組み合わせる。

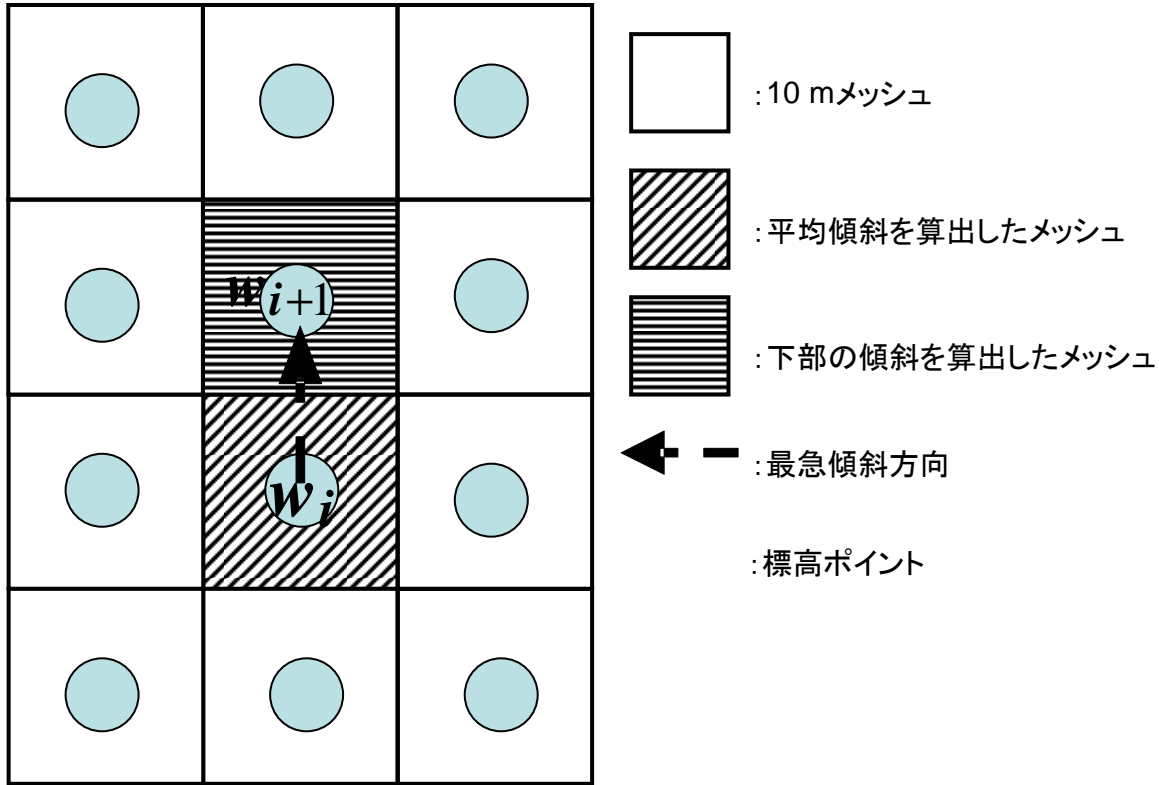


図-5.22 斜面下部の傾斜

過去の崩壊は、防災科学技術研究所が無料で公開している地すべり地形分布図データベース（防災科学技術研究所 2009）を用いる。このデータは、北海道と関東の一部以外の地域が公開されており、測地法、投影法およびファイル形式は、JGD2000 の経緯度のシェープファイルである。作成方法は、地すべり地形の判読経験が 20 年以上で、地すべり地形に関して高度な判読技術と知識を持つ研究者が、実体鏡を用いて 4 万分の 1 モノクロ密着焼きの空中写真から、単位地すべりの幅が約 150 m 以上の大きさを抽出したものである。地すべり地形分布図データベースにおいて過去に崩壊があった対象地は、西原、葛城山、大紀、滝向、落合の 5 地域である。

なお、属性の算出や抽出に用いた 10 mDEM は、(株)北海道地図が発行している 10 m メッシュのデジタル標高データであり、このデータの測地法、投影法およびファイル形式は JGD2000 の平面直角座標のシェープファイル、データは国土地理院が発行している 1/25,000 地形図の等高線をデジタル化し

てできた等高線データベースから、プログラム処理で作成された 10 m 間隔の格子点である。

これらの属性をラフ集合理論に適用させるには、各属性をカテゴリーに分類する必要がある。そのため、連続値データや質的データを表-5.2 に示すように分類する。過去の崩壊のデータは 5 地域（西原，葛城山，大紀，滝向，落合）のみであるので、それらの地域では条件部に関する属性は 7 つあり、その他の地域は 6 つとなる。

表-5.2 条件部に関する属性のカテゴリーによる分類

属性	10m メッシュによる分類	
平均傾斜	緩	～10
	やや緩	10～20
	中	20～30
	やや急	30～40
	急	40～
斜面の水平形状	鋭い谷	～160
	広い谷	160～170
	直線	170～190
	広い尾根	190～200
	鋭い尾根	200～
斜面の鉛直形状	凸	～160
	やや凸	160～175
	等斉	175～185
	やや凹	185～200
	凹	200～
下部の斜面	緩	～10
	やや緩	10～20
	中	20～30
	やや急	30～40
	急	40～
0次谷	無	無
	有	有
崖錐	無	無
	有	有
過去の崩壊履歴	無	無
	有	有

5.3.3 結論部に関する属性の決定

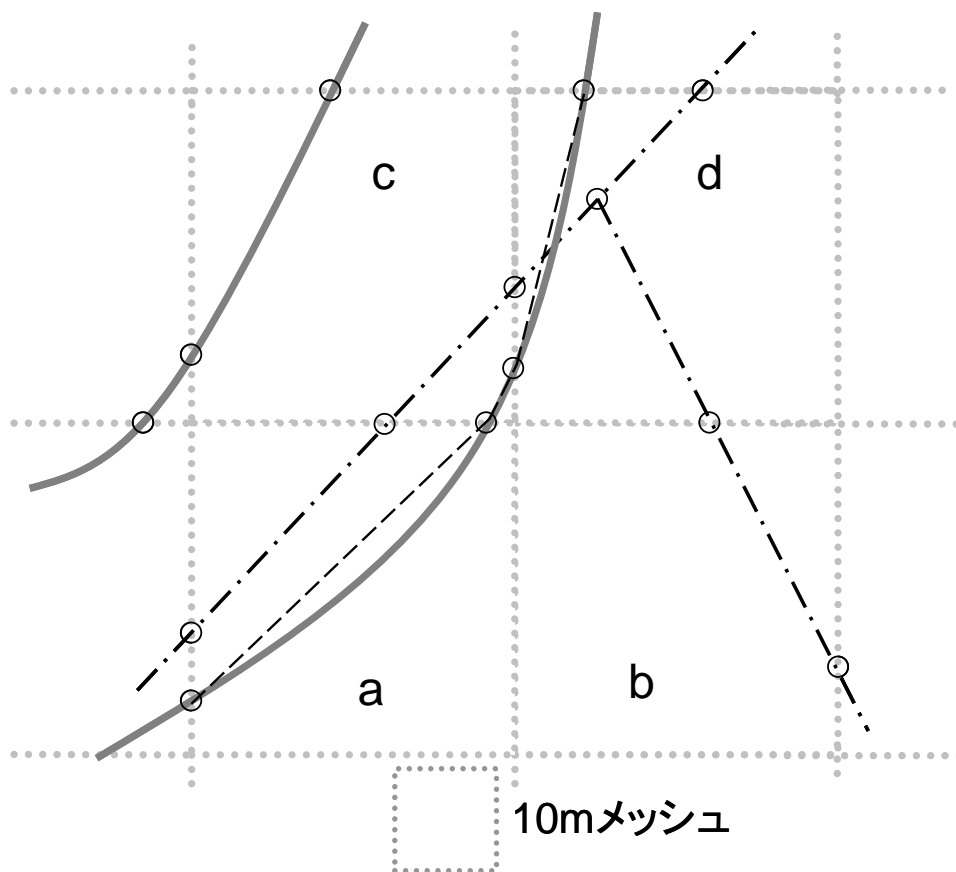
第二章，三章，四章では斜面方向へ配置された幹線と等高線に沿って等間隔に配置された支線とが組み合わされたはしご型路網を用いて，作業効率の高い配置形状を分析した。この路網において幹線の機能は，作業現場へ到達することが主であり，支線は安全に作業することである。主な機能が異なることから，幹線と支線とでは配置手法は異なると考えられ，そのため幹線と支線の開設適地は異なる。そこで，本研究では結論部に関する属性を幹線の開設適地（以下，幹線の開設地点とする）と支線の開設適地（以下，支線の開設地点とする）とし，さらに森林作業道を作設されていない場所（以下，作設されていない地点）を加えた3種類とする。

斜面方向に配置された幹線と等高線方向に配置された支線との分類は，等高線との関係から目視によって容易に行える。しかし，この結果，得られた分類には，個人差があり再現性に乏しい。そこで本研究では，客観的で再現性のある分類方法として，等高線と森林作業道との交角を用いる。これは，等高線に沿っている支線は交角が小さくなり，斜面方向に配置している幹線は交角が大きくなることから，両者の差が明確になると考えたためである。交角は，10 m 状のメッシュを作成し，作成された各 10 m メッシュ内部を通る森林作業道の両端を結んでできる線分と，等高線の両端を結んでできる線分との交角として算出する。ここで，メッシュ内部で等高線と森林作業道が交差していない場合（図-5.23a メッシュ）でも線分の交角を算出するが，メッシュ内部に等高線がない場合（図-5.23b メッシュ）は交角の算出を行わない。また，メッシュ内部に複数の等高線がある場合（図-5.23c メッシュ）は，森林作業道と交差している等高線または森林作業道に最近接の等高線を用いて交角を算出し，メッシュ内部で森林作業道が分岐している場合（図-5.23d メッシュ）は，森林作業道の分岐点を端点の1つとする線分を考え交角を算出する。

森林作業道を幹線と支線とに分類するにあたっては，まず路網を分岐点で分割して分岐のない路線に分ける。さらにその路線を 50 m 単位で分割し，その区間を分類単位とする。区間ごとに通過するメッシュの中で交角が 30 度以上となるメッシュの比率を算出し，その比率が 30 %以上の路線を幹線，30 %未満の路線を支線と分類する。

また，作設されていない地点は森林作業道が開設されていない地点とする。

各属性の分類に用いた森林作業道の位置座標データは GPS (Trimble 製 Pathfinder Pro XR) で測位して得たデータを後処理ディファレンシャルして，誤差を 50 cm 以下まで修正したデータであり，そのデータの測地系，投影法およびファイル形式は，JGD2000 の平面直角座標のシェープファイルに変換したものとする。



- · — · — · 路網
- 等高線(5m)
- 端点
- 端点を結んでできる線分

作業道と等高線がある a のメッシュでは、交角を算出する

等高線のない b のメッシュでは、交角を算出しない

等高線が複数ある c のメッシュでは、作業道と最も近い等高線の線分から交角を算出する

作業道が分岐する d のメッシュでは、分岐点で分割して交角を算出する

図-5.23 交角の計測方法の模式図

5.3.4 しきい値の決定

過去の研究において、ルールを抽出するためのしきい値は、誤判別領域にあるデータを含まない 1.00 (広兼ら 1997, 岡本 2002, 奥原ら 2004, 竹本ら 2004, 榎本ら 2007, 田辺ら 2007) や、誤判別領域にあるデータの半分を含む 0.50 (津本ら 1994, 榎原ら 2000, 佐藤ら 2002) が用いられている。しきい値を設定するにあたり、考慮すべき点は結論部に関する属性 (図-5.13 では作業道ありと作業道なし) に該当するデータ数の比率に確信度が影響を受けることである。その例を図-5.24 に示す。図-5.24 ではそれぞれの結論部に該当するデータの比率は、作業道なしでは 0.86 (60/70), 作業道ありでは 0.14 (10/70) となっており、明らかに作業道なしに偏っている。このような場合、比率が高い方のルールでは、整合領域と誤判別領域にあるデータ数は相対的に誤判別領域の方が少なくなるため、その結果、比率の高い方のルールの確信度は全体的に高くなる。一方、比率の小さい方のルールの確信度は逆に低くなる。したがって、結論部に関する属性に該当するデータ数の比率を考慮して、しきい値を設定しなければ、有益なルールを抽出することは難しい。そこで、対象地ごとにそれぞれの結論部に該当するデータ数が占める割合を図-5.25 に示す。図-5.25 から、それぞれの割合は作設されていない地点では 7~9 割と大きく、支線の開設地点では 1~2 割、幹線の開設地点では 1 割以下と幹線の開設地点と支線の開設地点は小さい値を示している。このことから、本研究では、比率の小さい幹線の開設地点と支線の開設地点のしきい値を 0.50 に、比率の大きい作設されていない地点では 1.00 に設定して、ルールの抽出を行う。

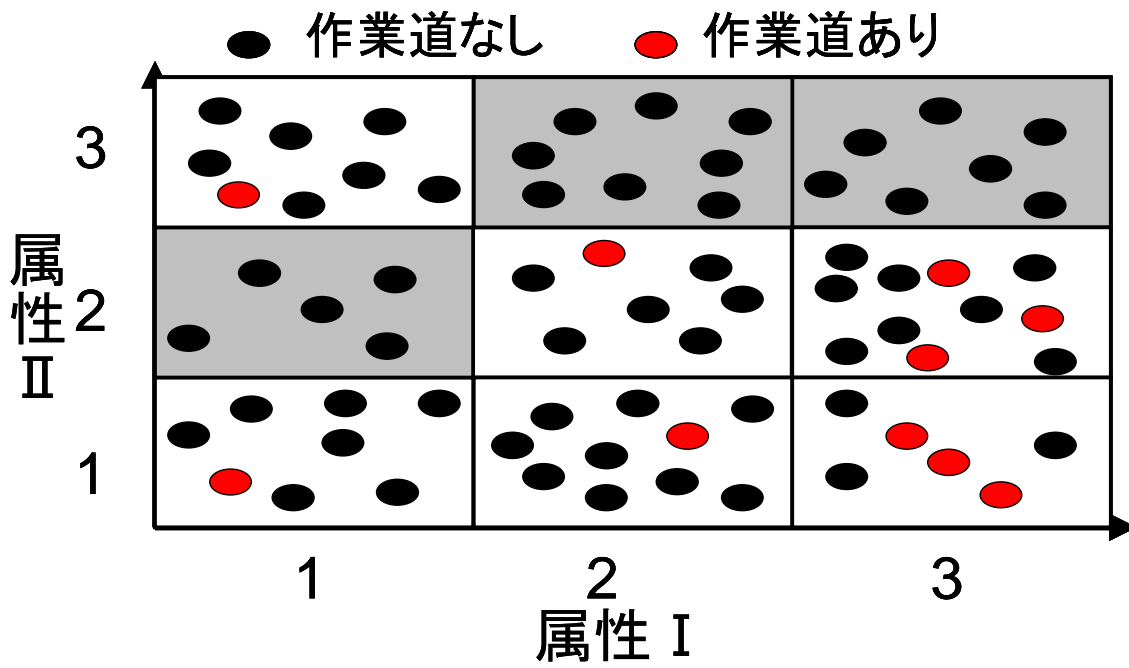


図-5.24 しきい値の設定で考慮すべき例

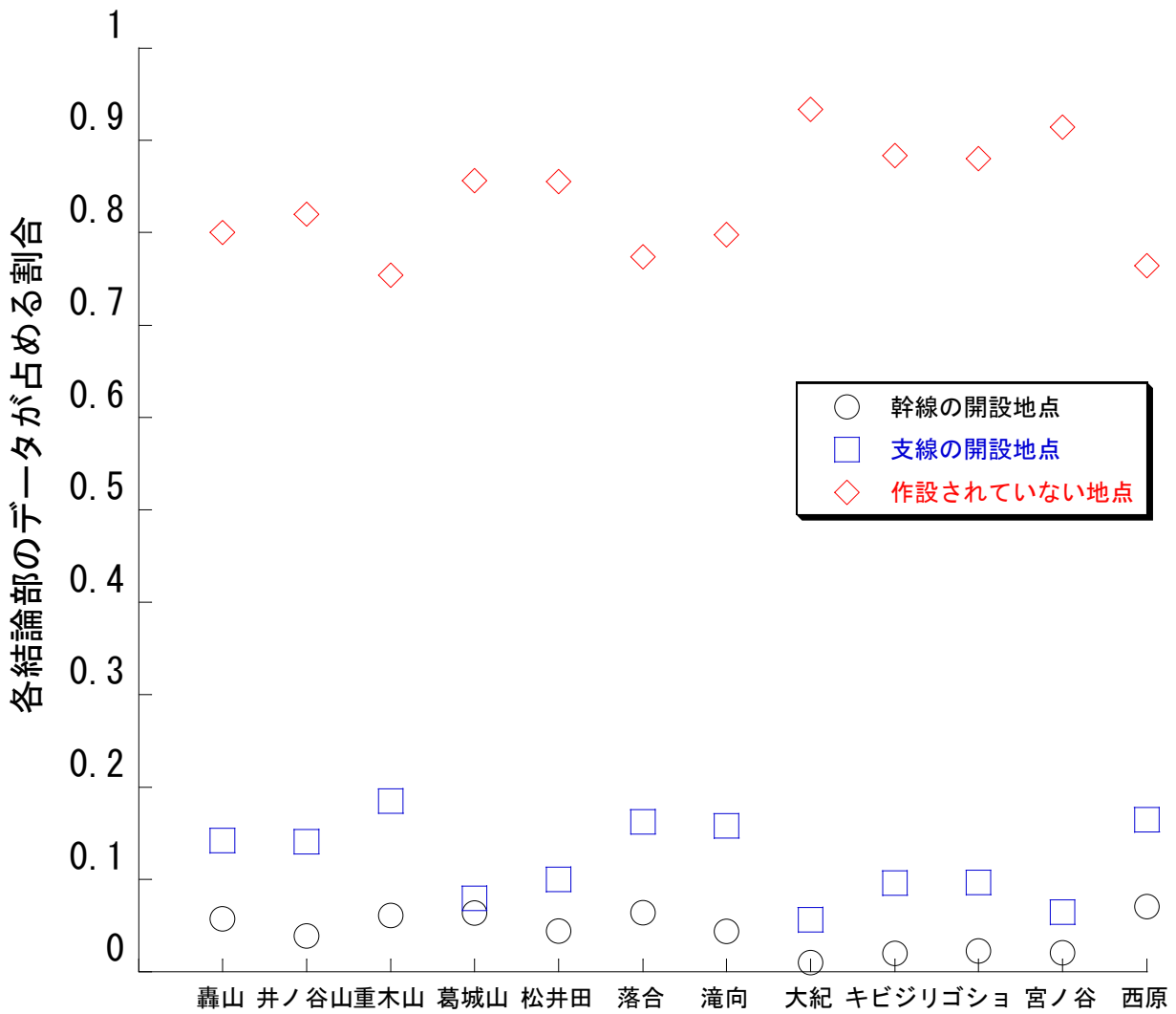


図-5.24 各結論部のデータ数が占める割合

5.3.5 評価方法

ラフ集合理論の適用可能性の評価は、抽出されたルールに該当する集合を T ，結論部 b に該当するデータの集合を B として、(5.3) 式から算出される判別割合 D を用いて評価する。

$$D = \frac{\text{Card}[T]}{\text{Card}[B]} \quad (5.3)$$

これによって、抽出されたルールで各結論部ほどの程度判別できるかを評価できる。

5.4 適用可能性の評価結果

5.4.1 ラフ集合理論から抽出した地形条件

ラフ集合理論を用いて抽出した幹線の開設地点となる条件の一部を表-5.3 に示す。例えば、条件 A は「平均傾斜が緩で水平形状が広い尾根で、鉛直形状がやや凸を満たす地点は、幹線の開設地点になる」ことを表す。このようにラフ集合理論によって、作業道の選定条件が明確になることが分かる。また地域によって抽出される選定条件の数は異なり、幹線の開設地点では 15~97 個、支線の開設地点では 29~222 個、作設されていない地点では 76~277 個となった。

表-5.3 ラフ集合理論から抽出した選定条件の一部(落合の幹線の開設地点の一部)

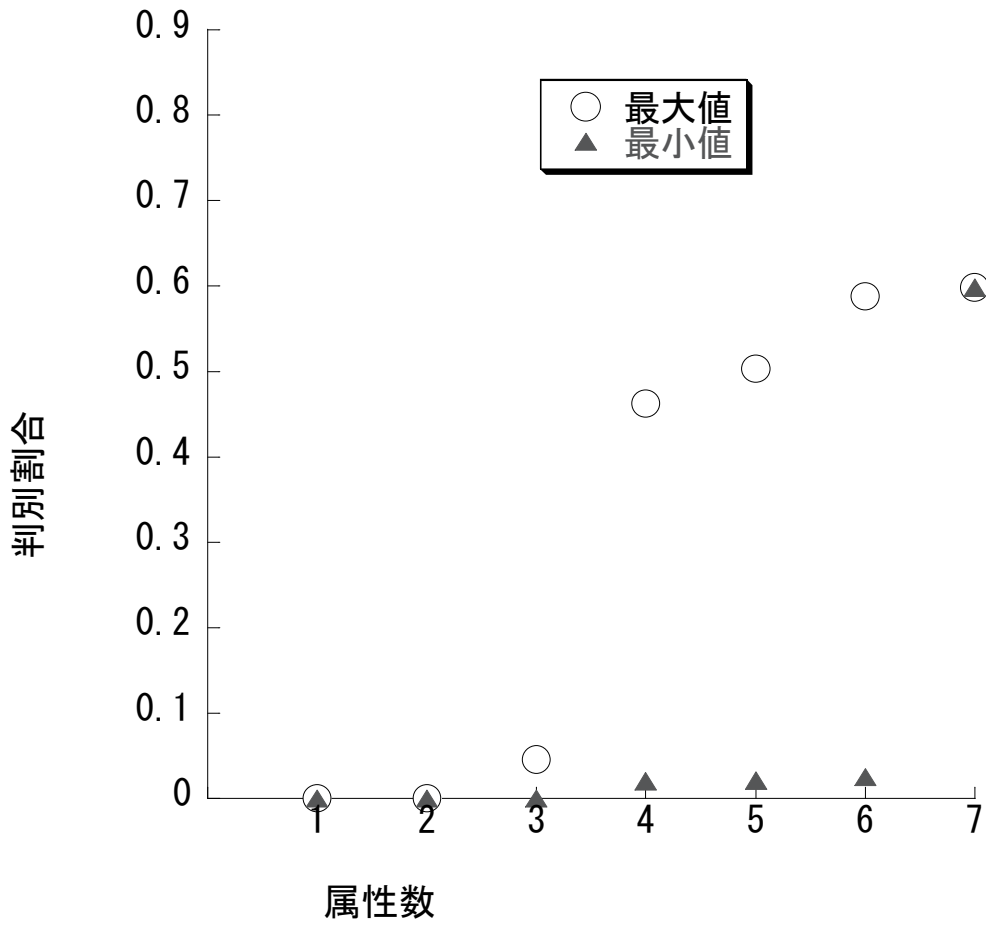
ルール	傾斜	水平	鉛直	下部	崖錐	0次谷	履歴	属性数
A	緩	広い尾根	やや凸					3
B	緩	谷	凸			無		4
C	緩		凸	中		無		4
D	緩	谷	やや凸	やや緩				4

5.4.2 属性数と判別割合との関係

ラフ集合理論の特徴として、条件部に関する属性数が増加すると、判別割合も増加するが、同じ属性数であっても、属性の組み合わせによって大きく異なる。例えば、本研究における判別割合と属性数との関係(図-5.26)では、属性数が増えると最大判別割合が増えていくことが分かる。ただし、図-5.26 は各属性数において、判別割合が最大となる組み合わせと最小となる組み合わせの判別割合を示している。このように属性数が増加すると、判別割合が増加することが本研究でも確認された。したがって、地形属性数が多いほうが判別できる割合が増加するので、経験的知識の明確化には、多くの地形属性を

用いての分析が適切である。しかし、多くの地形属性を用いると得られた条件が複雑になるため、その条件の評価には時間を要してしまう。そのため、最適な属性数は判別割合が高いことと、なるべく属性数が少ないことであると考えられる。そこで、全地形属性を用いる必要があるかを明らかにするために、結論部ごとに、属性数による最大判別割合の推移（図-5.27）を算出した。幹線の開設地点の判別割合は、3属性まではどの属性の組み合わせでも2割以下と低いが、4属性では大紀と宮ノ谷、西原以外の地域において判別割合が増加して、3割以上となり、さらに、属性数が増加するにしたがって、判別割合も増加する。支線の開設地点の判別割合は、3属性までは1割以下と幹線よりも低いが、4属性では葛城山、大紀、宮ノ谷以外の地域で2割以上となり、5属性では大紀と宮ノ谷以外の地域で3割以上と属性数が増加するにしたがって判別割合も増加する。作設されていない地点の判別割合は、3属性までは轟山以外の地域で3割以下ではあるが、幹線の開設地点や支線の開設地点と比較すると高い地域が多く、4属性で松井田以外の地域で3割以上となり、幹線の開設地点や支線の開設地点と同様に属性数が増加するにしたがって判別割合も増加する。すべての地形属性から3つ選んだ組み合わせでは、どの結論部でも判別割合は低い。4属性になると、組合せによっては高い判別割合を示しており、地域によっては5属性から、判別割合が変化しないところもある。しかし、幹線の滝向や支線の落合や滝向、大紀は最後の属性で判別割合が上昇している地域もあることから、ラフ集合理論の適用可能性の評価は、各結論部に全属性を用いた場合の判別割合を用いる。図-5.28に各結論部に対する全属性を用いた場合の判別割合を示すとおり、幹線の開設地点、支線の開設地点に関しては、大紀と宮ノ谷以外の10地域で5~8割の範囲にあった。一方、作設されていない地点では全ての地域で5割以上であった。このことから、大紀と宮ノ谷の幹線の開設地点と支線の開設地点以外は、どの結論部においても判別できていることが分かる。大紀と宮ノ谷の幹線の開設地点と支線の開設地点の判別割合が低かった理由として、図-5.25より分かるように幹線の開設地点と支線の開設地点の割合が他の地域と比較して小さいことから、幹線の開設地点、支線の開設地点のルールを抽出するしきい値が適切でなった可能性が示唆される。しかし、図-5.25において宮ノ谷や大紀と幹線の開設地点の割合が同様であるキビジリやゴショの森では、高い判別割合を示しており、各型が占める割合以外にも両者の判別割合を減らす要因があると考えられる。また、幹線の開設地点、支線の開設地点と作設されていない地点の全てのデータに対する判別割合は、全ての地域で約6割前後となり、判別できる割合は比較的高かった。幹線の開設地点や支線の開設地点で判別割合が低かった宮ノ谷山や大紀でも全てのデータに対する判別割合が高かったのは、全データの7~9割を占める作設されていない地点の判別割合が高かったためである。したがって、全てのデータに対する判別割合はどの地域でも6割であったことから、作業道の選定条件の抽出に対してラフ集

合理論を適用することは可能であると考えられる。



図一5.26 属性数と判別割合との関係(落合の幹線の開設地点の例)

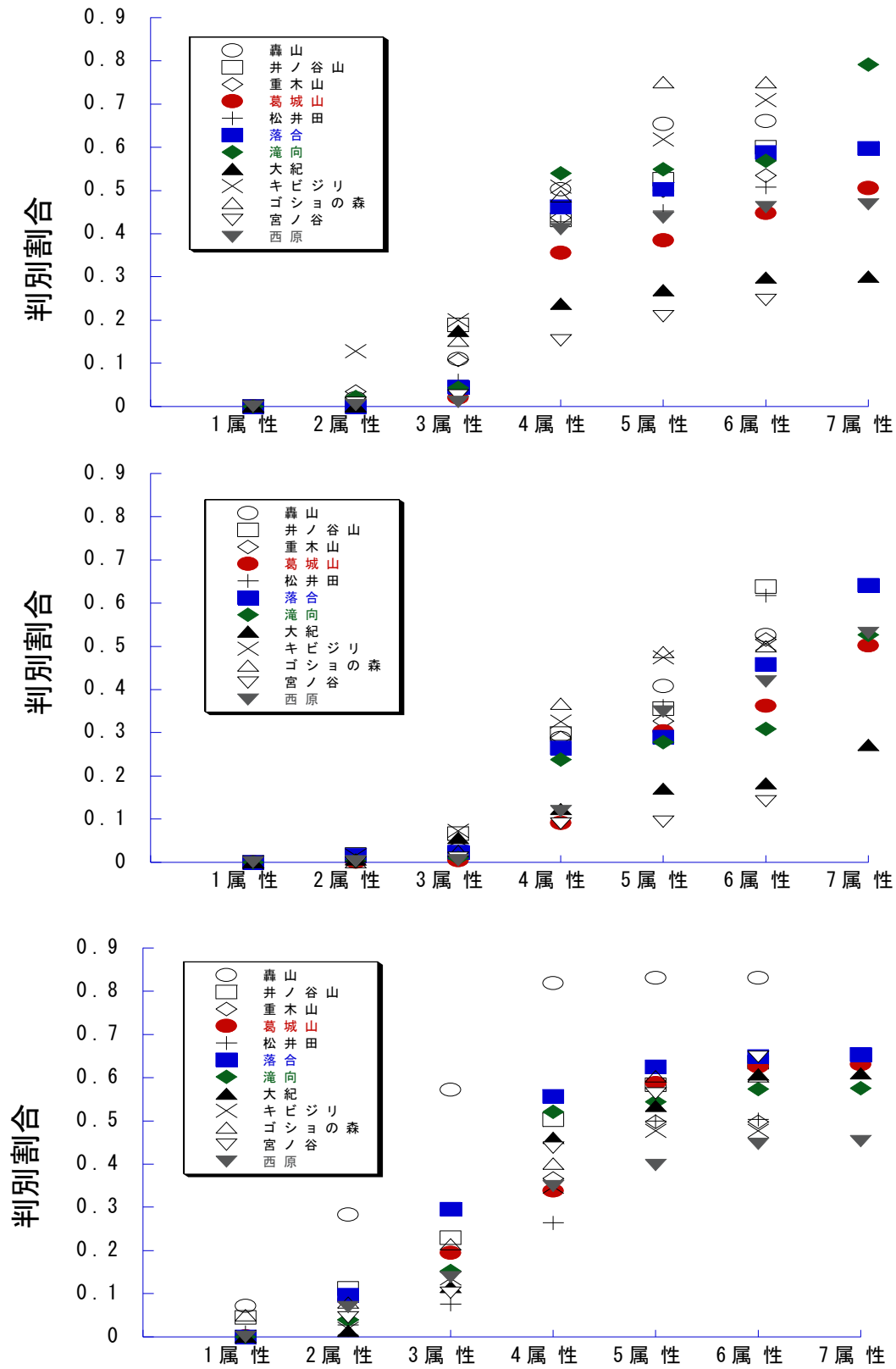


図-5.27 属性数と最大値の判別割合との関係

上図: 幹線の開設地点, 中図: 支線の開設地点, 下図: 作設されていない地点

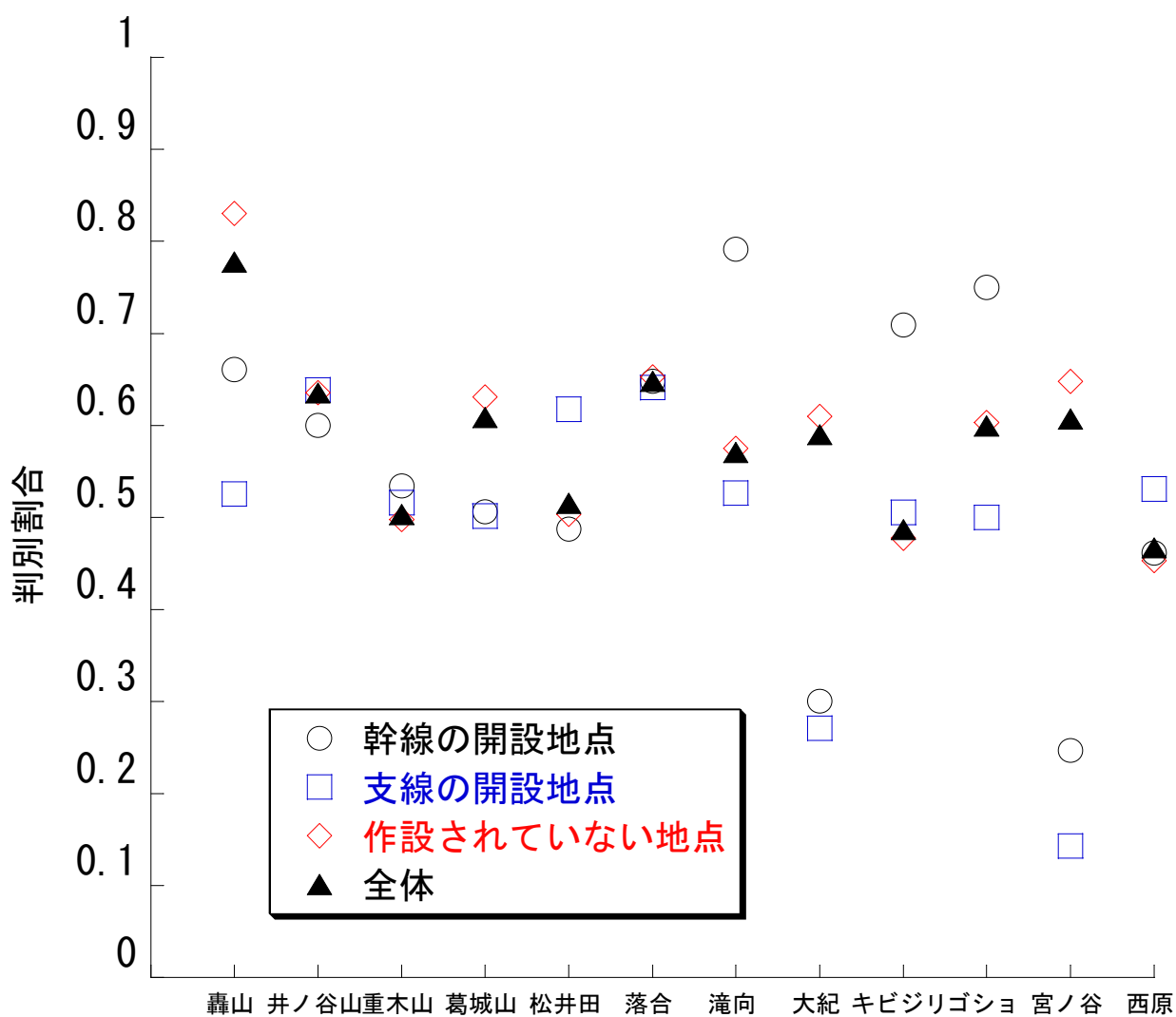


図-5.28 全属性を用いた場合の判別割合

5.5 考察

5.5.1 カテゴリー数がラフ集合理論で得られる結果に与える影響

ラフ集合理論を適応するにあたっては、連続変量データをカテゴリーデータに分類する必要がある。ここでは、表-5.2 に示したとおり、平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、下部の傾斜に関しては5 カテゴリーに、崖錐、0次谷、過去の崩壊に関しては2 カテゴリーに分類した。このカテゴリー数を少なくすると、分析や得られる条件が簡便になるが、判別割合の増加は難しい。したがって、表-5.2 に示したカテゴリー数を少なくした場合に図-5.28 と同等の判別割合であれば、得られた条件はより簡便になり、評価は容易になる。そこで、表-5.2 のカテゴリー分類が適切であったかを確認するために、平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、下部の傾斜のカテゴリー数を3 つに減らし、崖錐、0次谷、過去の崩壊のカテゴリー数は2 つ（表-5.4）のままで、再度判別を行い、その結果得られた判別割合（以下、3 カテゴリーによる判別割合）と表-5.2 のカテゴリー分類を用いて判別して得られた判別割合（以下、5 カテゴリーによる判別割合）とを比較する。ここでしきい値は、幹線の開設地点と支線の開設地点では0.50、作設されていない地点では1.00とする。その結果（図-5.29）、3 カテゴリーによる判別割合において、判別割合が0.5以上となったのは、0.57の轟山の作設されていない地点と0.54のゴシヨの森の作設されていない地点、0.50のゴシヨの森の全体だけで、その他の地域の結論部では0.5以下と判別割合は低かった。また3 カテゴリーによる判別割合と5 カテゴリーによる判別割合とを比較して、3 カテゴリーによる判別割合の方が高い地域は、大紀の支線の開設地点のみとなり、他の地域の各結論部は5 カテゴリーより低い値となった。このことから、3 カテゴリーに判別割合では、5 カテゴリーによる判別割合より低い値となった。これはカテゴリー数を減らすと、条件部を構成するカテゴリーの組み合わせが減少するため、分析に要する時間の短縮や結果の簡便化という利点はあるものの、条件部に関する属性の組み合わせの減少により、判別割合は低くなる。したがって、適切な判別割合を得るためには、分析に時間がかかり、結果が複雑になる可能性があるものの、カテゴリー数はある程度設定する必要があると考えられる。

表-5.4 条件部に関するカテゴリーの再分類 (3 カテゴリー)

属性	10m メッシュによる分類	
傾斜(度)	緩	~20
	中	20~30
	急	30~
斜面の水平 形状	谷	~170
	直線	170~190
	尾根	190~
斜面の鉛直 形状	凸	~175
	等斉	175~185
	凹	185~
下部の斜面 (度)	緩	~20
	中	20~30
	急	30~
0次谷	無	無
	有	有
崖錐	無	無
	有	有
過去の崩壊 履歴	無	無
	有	有

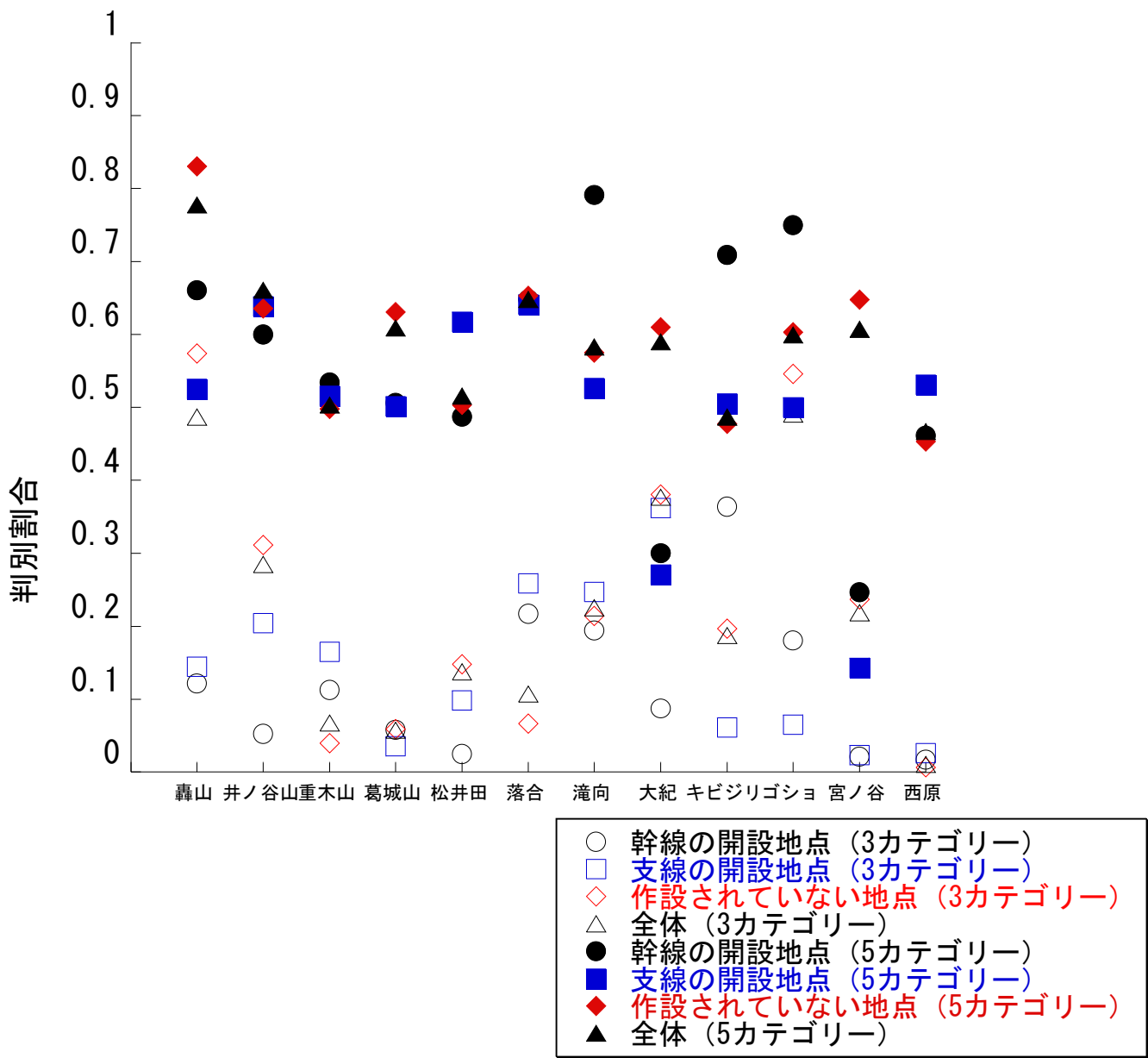


図-5.29 カテゴリーの違いによる判別割合の変化

5.5.2 しきい値がラフ集合理論で得られる結果に与える影響

本研究においてラフ集合理論を導入するにあたって、抽出するルールを決定するために用いた確信度のしきい値は、幹線の開設地点と支線の開設地点では 0.50、作設されていない地点では 1.00 とした。その結果、全データの 6 割の結論部を判別できたが、幹線の開設地点、支線の開設地点では、確信度の低いルールも抽出される。一方で、確信度のしきい値を高くすると、抽出されたルールによる判別割合が低下する。そこで、判別割合に対する確信度のしきい値の影響を明らかにするために、幹線の開設地点と支線の開設地点において、確信度のしきい値を 0.50、0.75、1.00 と変化させ、判別割合がどのように変化するか比較した。その結果を図-5.30 に示す。まず、幹線の開設地点のしきい値の変化は 1.00 では 0.32 の滝向と 0.36 のキビジリ以外では、判別割合は 0.3 以下、しきい値が 0.75 では 0.64 のキビジリ以外では 0.5 以下となっており、しきい値が 1.00 から 0.50 に下がっていくにつれ、幹線の開設地点の判別割合は増加していることが分かる。支線の開設地点のしきい値の変化は 1.00 ではどの地域も判別割合は 0.3 以下、しきい値が 0.75 ではどの地域も 0.5 以下となっており、しきい値が 1.00 から 0.50 に下がっていくにつれ、支線の開設地点の判別割合は増加していることが分かる。幹線の開設地点、支線の開設地点ともにしきい値が 0.75 になると判別割合はしきい値 1.00 より高い値を示すが、それでも多くの地域ではデータの半分は判別できてはいなかった。したがって、幹線の開設地点と支線の開設地点において、多くの地域で高い判別割合を得るには、確信度が低い 0.50 が妥当であることが分かる。

判別割合

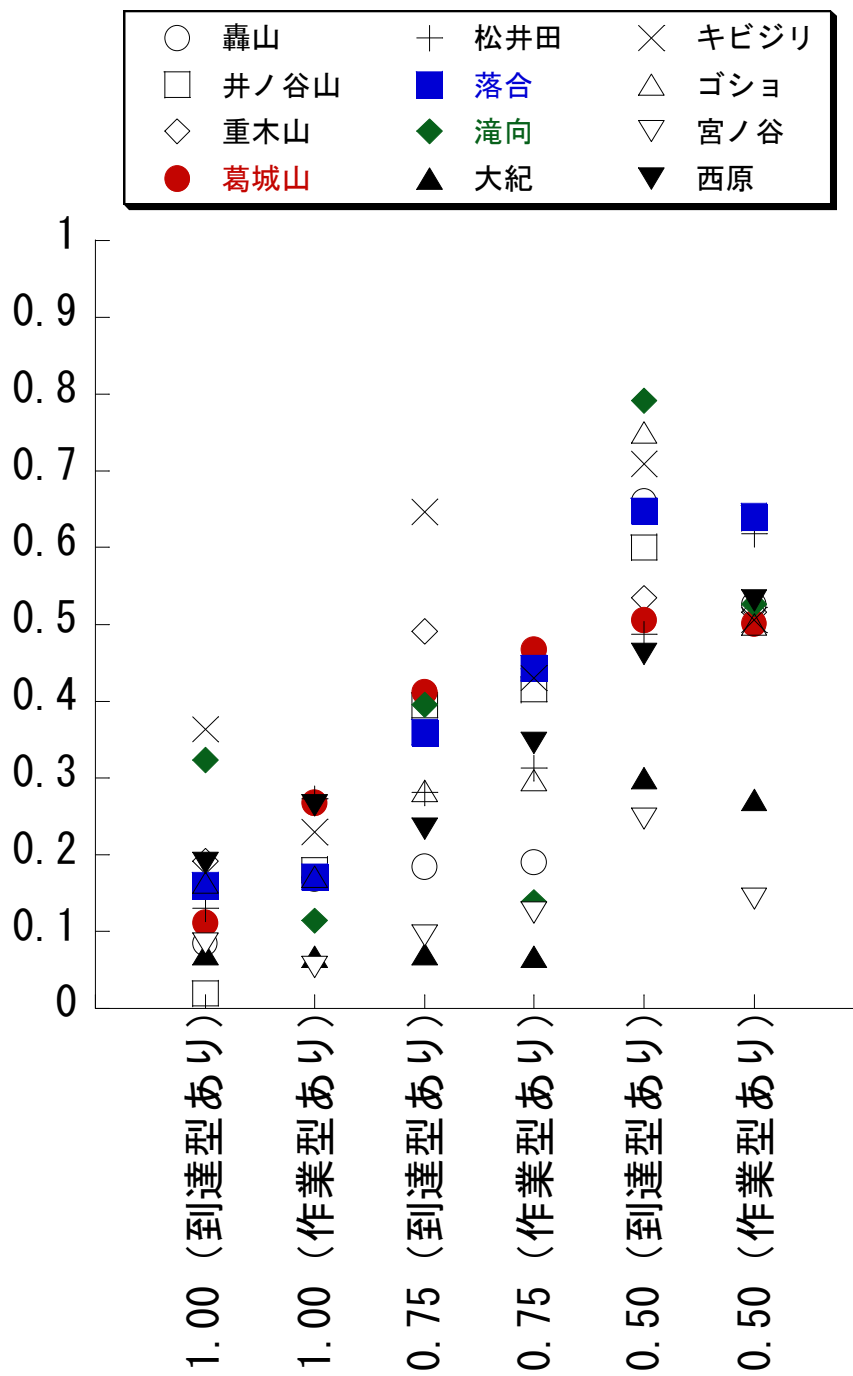


図-5.30 しきい値による判別割合の違い

5.6 まとめ

本章では、森林作業道開設地の選定条件の明確化に対して、ラフ集合理論が適用できるかを明らかにするために、判別割合を算出した。算出したその割合からラフ集合理論の適用可能性を評価した結果、図-5.28に示すとおり、判別割合は高く、ラフ集合理論の有効性が示された。このことから、ラフ集合理論は専門家しか有していなかった技能や意思決定能力を明確できるエキスパートシステムとして、適用できる可能性がある。これは、林業従事者が経験的に行っている（例えば、定性間伐の基準や伐倒方向の決定など）の明確化への応用が期待される。

また、得られた条件を分析することによって、熟練の技術者が開設適地や不適地を選定している条件の特徴を明らかにすることができる。そこで、第六章ではコラムスコア法と組み合わせ表、クラスター分析を用いて、得られた条件からそれぞれの条件の地形的特徴を明らかにする。

6章 開設地の選定条件となる地形的特徴の抽出

6.1 はじめに

経験的知識によって行われる森林作業道の開設地の選定条件の明確化に対し、第五章ではラフ集合理論が適用可能であることが示された。経験の浅い技術者でも、容易に森林作業道の作設計画を行うには、抽出した選定条件がどのような地形で、どのような地域に適用できるかを明らかにする必要がある。そこで、本章では開設地の選定に必要とされる地形属性、地形カテゴリー、そのカテゴリーの組合せ（条件）の地形的特徴を明らかにし、カテゴリーの組合せ（条件）が適用できる地域を明らかにすることを目的とする。そのために、地形属性に関しては結論部の判別で重要視している属性を評価する重要度と呼ばれる指標を用いて、評価する。地形カテゴリーとその組合せに関しては、ラフ集合理論で得られた地形条件は膨大で、地域によってその条件は異なることから、ここでは抽出された数百の条件を属性値単位に分解し、高評価である属性値に高得点を与えることで、共通性の高いカテゴリーやその組合せを抽出するコラムスコア法と組合せ表を用いて、共通性の高い地形カテゴリーとその組合せの絞込みを行い、さらにクラスター分析して、共通性の高い地形的特徴と適用できる地域を明らかにする。

6.2 評価方法

6.2.1 重要度

各地形属性が開設地の選定に寄与している割合を示す重要度 I から、地形属性に関する地形的特徴を明らかにする。重要度 I の算出方法を (6.1) 式に示す。

$$I = \frac{(D_a - D_d)}{D_a} \quad (6.1)$$

ただし、 D_a : 全属性を用いたときの判別割合、 D_d : 特定の属性を除いて算出した判別割合

(6.1) 式から重要度が 0 の場合、ある属性を除いて算出した判別割合と全属性を用いたときの判別割合が同値になることを示す。このことから、重要度が 0 に近いほど、その属性は重要ではなく、重要度が 1 に近いほど、その属性は重要と評価できる。

6.2.2 コラムスコア法

共通性の高い重要な地形カテゴリーの絞込み方法として、抽出した条件の汎用性（C.I.値）が高いこと、抽出した条件の条件部の長さ（条件部を構成する属性数）が少ないことの2つの条件を評価し、その評価が高かった条件の条件部にあるカテゴリーを抽出する方法が最も簡便であると考えられる。しかし、C.I.値と条件部を構成する属性数という次元の異なる2つの尺度の一元化が難しいこと、2つの条件において、評価の高い条件の条件部のみを抽出するため、評価の低い条件の条件部にあるカテゴリーの組み合わせは反映されないことがこの考えの問題として指摘されている（森ら 2004）。そこで、本章ではこれらの問題を解決したコラムスコア法（井上ら 2000）を用いて、各カテゴリーの共通性を評価した。これは、カテゴリーの共通性の指標であるコラムスコアを算出し、そのコラムスコアがしきい値以上であるカテゴリーを共通性が高いと判定する方法である。コラムスコアとは抽出した条件のC.I.値と、その条件の条件部を構成する属性数を用いて、その条件部に含まれるカテゴリーに得点を与え、その得点をカテゴリーごとに合計した値である。このコラムスコアは以下のように算出する。抽出した条件数を K 個とし、 k 番目の条件のC.I.値を P_k 、 k 番目の条件（ルール）の条件部に該当する集合を Q_k ($k=1, \dots, K$)、条件部を構成するカテゴリーを $z \in Z$ （ただし、 Z はすべてのカテゴリーの集合）とすると、 Q_k が n_k 種の z からなるとき、 Q_k におけるカテゴリー z のスコア S_{kz} を (6.2) 式を用いて算出し、(6.3) 式に代入して z のコラムスコア CS_z を算出する。

$$S_{kz} = \frac{P_k}{n_k} \quad [z \in Q_k \text{ のとき}] \quad (6.2)$$

$$S_{kz} = 0 \quad [z \notin Q_k \text{ のとき}] \quad (6.2)$$

$$CS_z = \sum_{k=1}^K S_{kz} \quad (6.3)$$

ここで、(6.2) 式におけるカテゴリーのスコアはC.I.値を、得られた条件（ルール）の条件部を構成する属性数で割った1カテゴリーあたりのC.I.値になる。

ここで、(6.2) 式、(6.3) 式について、表-6.1の例を用いて説明する。表-6.1の例は、説明の便宜

上作成したもので、実際には無い。表-6.1において条件1のC.I.値は0.60で、構成する属性数は平均傾斜が緩と水平形状が尾根の2属性であるため、各カテゴリーのスコアは0.30 ($0.60/2$)となる。この値が平均傾斜の緩と水平形状の尾根のスコアになる。同様に、条件ごとに抽出されたカテゴリーのスコアを算出し、これをカテゴリーごとに合計した値がコラムスコアとなる。表-6.2に表-6.1から算出されるコラムスコアを示す。しきい値の決定にあたっては、井上ら(2000)の手法にならい、コラムスコアの平均値の1.5倍とする。表-6.1から算出されるコラムスコアのしきい値を表-6.3に示す。表-6.3から、しきい値以上である緩傾斜、尾根と凸が共通性の高い地形カテゴリーと判定される。

このような方法を用いて、実際に対象路網ごとにコラムスコアを算出し、共通性の高い地形カテゴリーを判定した。

表-6.1 コラムスコアの算出に用いる例

	属性のカテゴリー								C.I.値
	平均傾斜		斜面の水平形状			斜面の鉛直形状			
	緩傾斜	急傾斜	谷	直線	尾根	凸	等斉	凹	
条件 1	○				○				0.60
条件 2		○			○	○			0.60
条件 3	○		○			○			0.30
条件 4			○			○			0.40

表-6.2 表-6.1 から算出されるコラムスコア

	属性のカテゴリー								C.I.値
	平均傾斜		斜面の水平形状			斜面の鉛直形状			
	緩傾斜	急傾斜	谷	直線	尾根	凸	等斉	凹	
条件 1	0.30				0.30				0.60
条件 2		0.20			0.20	0.20			0.60
条件 3	0.10		0.10			0.10			0.30
条件 4			0.20			0.20			0.40
コラムスコア	0.40	0.20	0.30		0.50	0.50			

表-6.3 表-6.1 から算出されるしきい値

コラムスコアの平均値	0.24
コラムスコアのしきい値	0.36

6.2.3 組合せ表

ここでは算出したコラムスコアと抽出した条件の C.I.値から作成される組合せ表を用いて、結論部の選定条件に共通性の高い地形カテゴリーの組合せ（条件）を明らかにする。組合せ表とは、条件部を構成するカテゴリーを 2 属性のカテゴリーの組み合わせに分割して、分割してできた組み合わせから共通性の高いカテゴリーの組み合わせを再構築する表である。まず、表-6.1 の例から作成される組み合わせ表を表-6.4 に示す。表-6.4 において、行はカテゴリー、列はカテゴリーとそれに対するコラムスコアで構成されており、それぞれのセルの値は C.I.値から算出される配分スコアとする。この配分スコアを列ごとに集計した値はコラムスコアと一致する。配分スコアの算出方法は、①セルを構成する 2 カテゴリーの組み合わせをもつ条件を検索し、②該当してなければ 0 をセルに付加し、該当していれば、その条件の C.I.値を、その条件の条件部を構成するカテゴリーから 2 カテゴリーの組み合わせを抽出する数の 2 倍で割った値をそのセルに付加する、③すべての条件に対して①、②の工程を行う。この配分スコアの算出方法を表-6.1 の例を基に説明する。平均傾斜が緩で、斜面の水平形状が谷である組み合わせに該当する条件は、条件 3 のみになる。条件 3 の C.I.値は 0.30 で、条件部は 3 種類のカテゴリーから構成されているので、2 カテゴリーの組み合わせ数は 3 となる。したがって、配分スコアは 0.05 ($0.30/3/2$) になる。また、斜面の水平形状が谷で、斜面の鉛直形状が凸である組み合わせに該当する条件は、条件 3 と 4 になる。条件 4 の C.I.値は 0.4 で、条件部は 2 種類のカテゴリーから構成されているので、2 カテゴリーの組み合わせ数は 1 となる。したがって、条件 4 から得られるスコアは 0.20 となり、このセルの配分スコアは条件 3 と条件 4 の合計値 0.25 ($0.05+0.20$) となる。このように各セルに該当する配分スコアを算出し、組合せ表を作成する。次に作成された組合せ表から、共通性の高いカテゴリーの組み合わせを抽出する。これは、コラムスコアと同様に配分スコアのしきい値を設定し、そのしきい値以上となる配分スコアを抽出して、抽出された配分スコアを列方向に組み合わせていく方法である。ただし、これができる列はコラムスコアのしきい値より、コラムスコアが大きい場合のみである。なお、しきい値は井上ら (2000) の手法にならない、配分スコアの平均値の 1.5 倍とする。表-6.4 から配分スコアのしきい値とコラムスコアを示す。このような方法から得られた共通性の高いカテゴリーの組み合わせは、尾根と緩、緩と尾根、谷と凸の 3 つになる (表-6.5)。

表-6.4 表-6.1 の例から作成された組合せ表としきい値

	緩	急	谷	直線	尾根	凸	等斉	凹
緩			0.05		0.30	0.10		
急					0.10	0.10		
谷	0.05					0.05+0.2		
直線								
尾根	0.30	0.10				0.10		
凸	0.05	0.10	0.20+0.05		0.10			
等斉								
凹								
コラムスコア	0.40	0.20	0.30	0.00	0.50	0.50	0.00	0.00

コラムスコアの平均値	0.24	配分スコアの平均値	0.15
コラムスコアのしきい値	0.36	配分スコアのしきい値	0.23

表-6.5 表 6.4 でしきい値以上であった配分セル

	緩	急	谷	直線	尾根	凸	等斉	凹
緩					0.30			
急								
谷						0.25		
直線								
尾根	0.30							
凸								
等斉								
凹								
コラムスコア	0.40				0.50	0.50		

6.3 解析結果

6.3.1 地形属性に関する地形的特徴

重要度と削除した属性との関係を結論部ごとに図-6.1 に示す。幹線の開設地点では対象地によってばらつきはあるものの、どの地域でも平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、下部の傾斜は重要度が 0.5 以上であり、それらの属性の平均値は、0.8 前後と高い。このことから、これら 4 属性が幹線の開設地点の判別に強い影響を与えている属性であり、次に影響を与えている属性は平均値が 0.4 である崖錐であることが分かる。しかし、崖錐の重要度を対象地別にみると、ゴシヨの森や滝向では高いものの、大紀や井ノ谷山では低く、対象地によって重要度が大きく異なることが分かる。また、0 次谷や過去の崩壊では、滝向の 0 次谷の 0.7 を除いて、どの地域も重要度は低い結果であった。

次に支線の開設地点では、大紀の斜面の鉛直形状と西原の下部の傾斜以外では、幹線の開設地点と同様に平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、下部の傾斜の 4 属性の平均値は 0.7~0.8 と高い。このことから、これら 4 属性が判別に強い影響を与えている属性であり、次に影響を与えている属性は崖錐、0 次谷や過去の崩壊であることが分かる。また、崖錐や過去の崩壊は幹線と比較して、平均値は高く、また対象地による重要度の差は少ないことから、幹線に比べるとこれらの属性はある程度、判別に影響を与えている。

最後に作設されていない地点では、上述した 4 属性の平均値は 0.6~0.7 の範囲にあり、幹線の開設地点や支線の開設地点と比較して低い。しかし、残りの 3 属性は重要度が 0.5 を越える地域はないことから、これら 4 属性が作設されていない地点の判別に強い影響を与えている。

ここから、どの結論部でも判別に強い影響を与えている属性は、平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、下部の傾斜の 4 つであった。そこで、それら 4 属性が開設地の選定にどの程度、利用されているかを明らかにするために、それら 4 属性のみを用いたときの判別割合 D_4 を算出し、その値と全属性を用いたときの判別割合 D_a との比を計算した。その結果を図-6.2 に示す。図-6.2 より、作設されていない地点では 0.4 の葛城山と 0.5 の松井田以外の地域で 0.7 以上となり、幹線の開設地点では 0.5 の宮ノ谷以外の地域で 0.7~0.8 となった。つまり、幹線の開設地点や作設されていない地点において、4 属性を用いて判別できるデータは、全属性を用いて判別できる割合の 7 割以上であり、4 属性の影響度が高いことが確認できる。一方、支線の開設地点ではゴシヨの森以外の地域では幹線の開設地点や作設されていない地点よりも低く、その値は 0.4~0.6 を示していることから、支線の開設地点においては 4 属性以外にも判別に影響を与えている属性があることが確認できた。

重要度

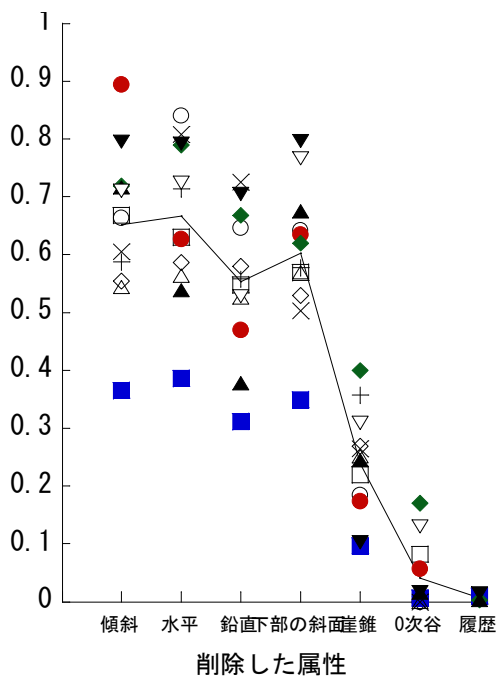
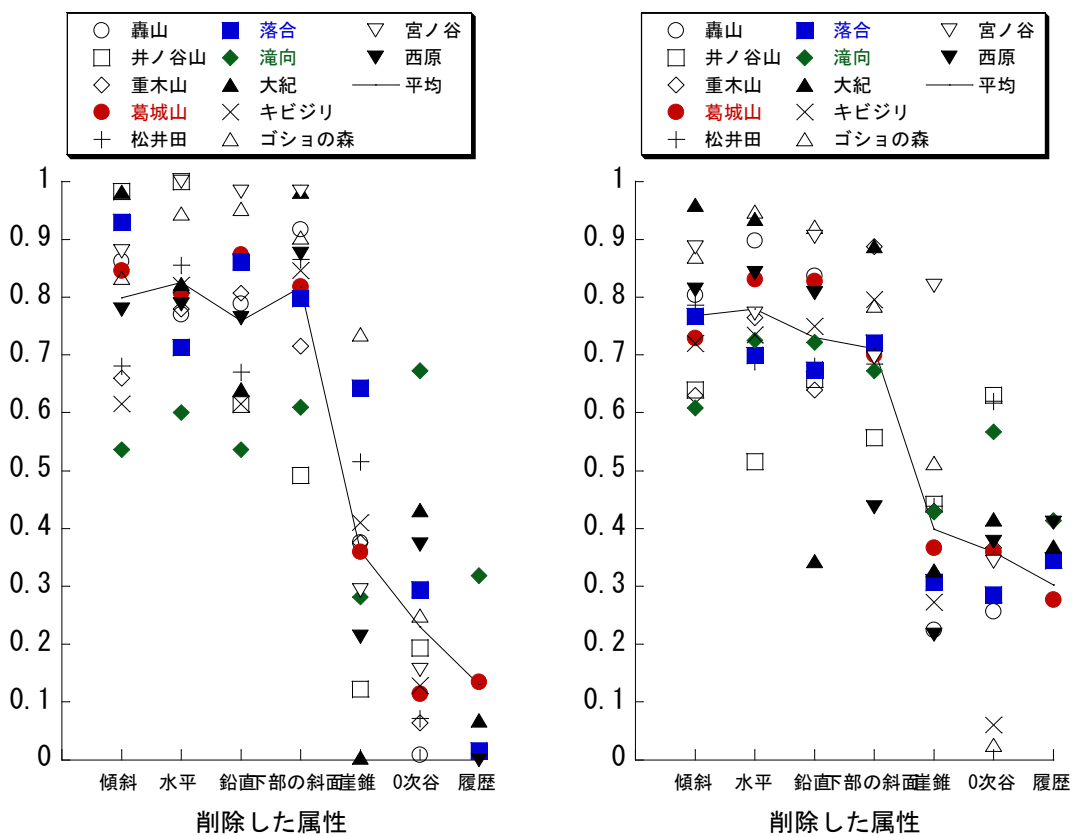


図-6.1 各属性の重要度

上左図: 幹線の開設地点, 上右図: 支線の開設地点

下図: 作設されていない地点

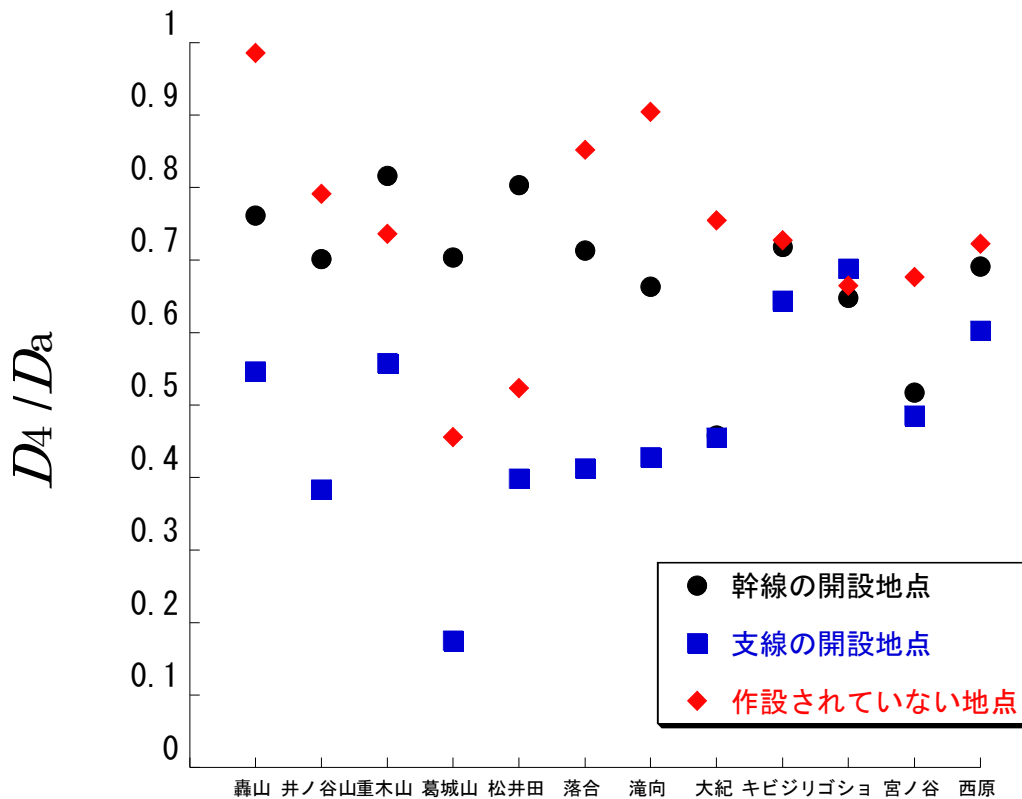


図-6.2 結論部別の $\frac{D_4}{D_a}$

6.3.2 地形カテゴリーに関する地形的特徴

コラムスコア法によって得られた結果を表-6.6~6.8に示す。半数以上の地域で共通となったカテゴリーは、幹線の開設地点（表-6.6）では平均傾斜のやや緩、やや凸、平均傾斜の緩、鋭い谷、広い尾根、下部の傾斜の緩、鋭い尾根の7種類、支線の開設地点（表-6.7）では0次谷の無、平均傾斜のやや緩い、中、下部の傾斜の中の3種類、作設されていない地点（表-6.8）では平均傾斜の緩、鋭い谷、等斉の3種類となった。この結果から、幹線の開設地点と作設されていない地点とでは半数以上の地域で抽出されたカテゴリーは、各結論部の判別に強い影響を与えている4属性に含まれていたが、支線の開設地点ではその4属性以外の0次谷の無もあることがわかった。

表-6.6 半数以上の地域で共通となったカテゴリー（幹線の開設地点）

重要カテゴリー	轟山	井ノ谷山	重木山	葛城山	松井田	落合	滝向	大紀	キビジリ	ゴシヨの森	宮ノ谷	西原	合計
平均傾斜	緩	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	7
	やや緩	○	○	○			○	○	○	○	○	○	10
	中			○	○								2
	やや急		○	○									2
水平形状	急												0
	鋭い谷型		○		○	○	○				○	○	7
	広い谷型												0
	直線型												0
	広い尾根	○	○	○	○		○	○				○	7
	鋭い尾根	○	○	○					○	○	○		6
鉛直形状	凸型			○						○			2
	やや凸型	○	○		○		○	○	○	○			8
	等斉型	○		○				○		○	○		5
	やや凹型					○							1
	凹型												0
下部の傾斜	緩	○	○	○		○				○	○		7
	やや緩					○			○	○			3
	中						○			○		○	3
	やや急									○		○	2
崖錐	急			○				○					2
	無							○			○		2
0次谷	有	○				○			○				4
	無					○					○		3
履歴	有							○					0
	無											○	1

表-6.7 半数以上の地域で共通となったカテゴリー（支線の開設地点）

重要カテゴリー	轟山	井ノ谷山	重木山	葛城山	松井田	落合	滝向	大紀	キビジリ	ゴシヨの森	宮ノ谷	西原	合計
平均傾斜	緩							○					1
	やや緩					○	○	○	○	○		○	6
	中		○				○	○	○	○	○		6
	やや急	○		○		○							3
水平形状	急	○			○								2
	鋭い谷型												0
	広い谷型	○	○	○	○							○	5
	直線型	○											1
	広い尾根			○				○					2
	鋭い尾根								○				1
鉛直形状	凸型										○		1
	やや凸型						○		○			○	3
	等斉型	○		○		○		○					4
	やや凹型		○		○					○			3
	凹型					○							1
下部の傾斜	緩							○		○			2
	やや緩												0
	中	○	○			○		○		○			6
	やや急												0
崖錐	急			○									1
	無			○				○			○		2
0次谷	有	○	○		○	○	○		○		○		3
	無			○				○				○	8
履歴	有											○	3
	無											○	1
						○	○						2

表-6.8 半数以上の地域で共通となったカテゴリー(作設されていない地点)

重要カテゴリー	轟山	井ノ谷山	重木山	葛城山	松井田	落合	滝向	大紀	キビジリゴシヨの森	宮ノ谷	西原	合計
平均傾斜			○	○	○	○	○	○	○		○	8
緩												2
やや緩		○					○					2
中								○			○	2
やや急								○		○		2
急			○	○								2
鋭い谷型	○		○	○			○		○		○	6
広い谷型				○								1
水平形状												2
直線型										○	○	2
広い尾根			○			○						2
鋭い尾根					○							1
凸型												0
やや凸型										○		1
鉛直形状				○		○	○		○	○	○	6
等斉型			○		○							3
やや凹型		○										2
凹型	○	○										2
緩	○					○	○					3
下部の傾斜												2
やや緩									○			2
中	○	○	○	○				○				5
やや急				○				○	○			3
急										○	○	2
崖錐			○			○	○		○			4
無有					○						○	2
0次谷						○	○			○		3
無有								○				3
履歴									○		○	1
無有												0

次にこれらの表から、クラスター分析を用いて、共通性の高いカテゴリーが似通っている地域のグループを作成し、そのグループが適用する地域を明らかにする。クラスター分析を行うにあたり、質的データを量的データに変換する必要があるため、すべての対象地に対して、重要となるカテゴリーを1、そうでないカテゴリーを0の2値変数に変換した。ここから、対象地を2地域取り出し、2値変数が一致していないカテゴリー数(非類似度)を計算し、これをすべての組み合わせ(したがって、本研究では ${}_{12}C_2$ で66通り)に対して行った。このように算出した非類似度から非類似度行列(表-6.9)を作成し、ウォード法によるクラスター分析を行った。なお、クラスター分析には、オーエムエス出版発行のエクセル統計を用いた。

表-6.9 非類似度行列(幹線の開設地点)

	轟山	井ノ谷山	重木山	葛城山	松井田	落合	滝向	大紀	キビジリ	ゴシヨの森	宮ノ谷	西原
轟山		4	5	9	8	7	6	8	4	7	6	10
井ノ谷山	4		5	7	8	7	4	10	6	9	6	8
重木山	5	5		10	11	12	9	11	9	8	7	11
葛城山	9	7	10		9	6	7	7	9	12	11	7
松井田	8	8	11	9		9	8	10	6	9	8	8
落合	7	7	12	6	9		5	11	7	12	9	7
滝向	6	4	9	7	8	5		10	8	11	6	8
大紀	8	10	11	7	10	11	10		8	9	8	8
キビジリ	4	6	9	9	6	7	8	8		7	8	10
ゴシヨの森	7	9	8	12	9	12	11	9	7		9	9
宮ノ谷	6	6	7	11	8	9	6	8	8	9		10
西原	10	8	11	7	8	7	8	8	10	9	10	

まず、幹線の開設地点のクラスター分析の結果を図-6.3 に示す。幹線の開設地点では、2つのクラスターに大別できた。1つ目のクラスターは、西原、滝向、落合、葛城山の4地域（以下、クラスターTAとする）となり、それ以外の8地域（大紀、ゴシヨの森、キビジリ、松井田、宮ノ谷、重木山、井ノ谷山、轟山）が2つ目のクラスター（以下、クラスターTBとする）となった。両クラスターが適用できる地域を把握するために、各クラスターの中で、共通性の高いカテゴリーと共通性が低いカテゴリーを選定した。共通性の高いカテゴリーは、表-6.6 から各クラスターの中で、半数以上の地域で選ばれたカテゴリーとし、共通性の低いカテゴリーは各クラスターの中で、どの地域でも共通性が高いと判定されなかったカテゴリーとする。その結果（表-6.10）、共通性の高いカテゴリーは、クラスターTAでは平均傾斜の緩、やや緩、鋭い谷、広い尾根、やや凸の5種類で、クラスターTBでは平均傾斜の緩、やや緩、鋭い尾根、等斉、やや凸、下部の傾斜の緩の6種類であり、その中で両者に共通しているカテゴリーは、平均傾斜の緩、やや緩、鉛直形状のやや凸の3種類であった。一方、共通性の低いカテゴリーは、クラスターTAでは平均傾斜のやや急、急、広い谷、直線、鋭い尾根、凸、等斉、やや凹、凹、下部の傾斜のやや緩、中、崖錐の無し、過去の崩壊の無しの13種類で、クラスターTBは平均傾斜の急、広い谷、直線、凹、過去の崩壊の無しの5種類であり、その中で両者に共通しているカテゴリーは、クラスターTBで抽出された平均傾斜の急、広い谷、直線、凹、過去の崩壊の無しの5種類であった。図-6.1では、平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、下部の傾斜の4属性が判別に強い影響を与えていると判断されたが、表-6.10からその中でも、全地域共通で幹線の開設地の判断に用いられる共通性の高いカテゴリーとなったのは、平均傾斜が緩いことと、斜面の鉛直形状がやや凸

な地形であった。さらに表-6.10 から、両クラスターでは共通性の高いクラスターである尾根の形状が異なることや鋭い尾根や等斉斜面の重要度が逆転していることが分かる。このように結論部の判別に用いられる共通性の高いカテゴリーに違いが生じた要因として、クラスターTA には四万十町以外の地域が、クラスターTB には松井田と大紀以外は四万十町のみが含まれていることから、地域差による可能性が示唆される。それは地質による違いおよびその違いから生じる作設方法の違いと予想される。

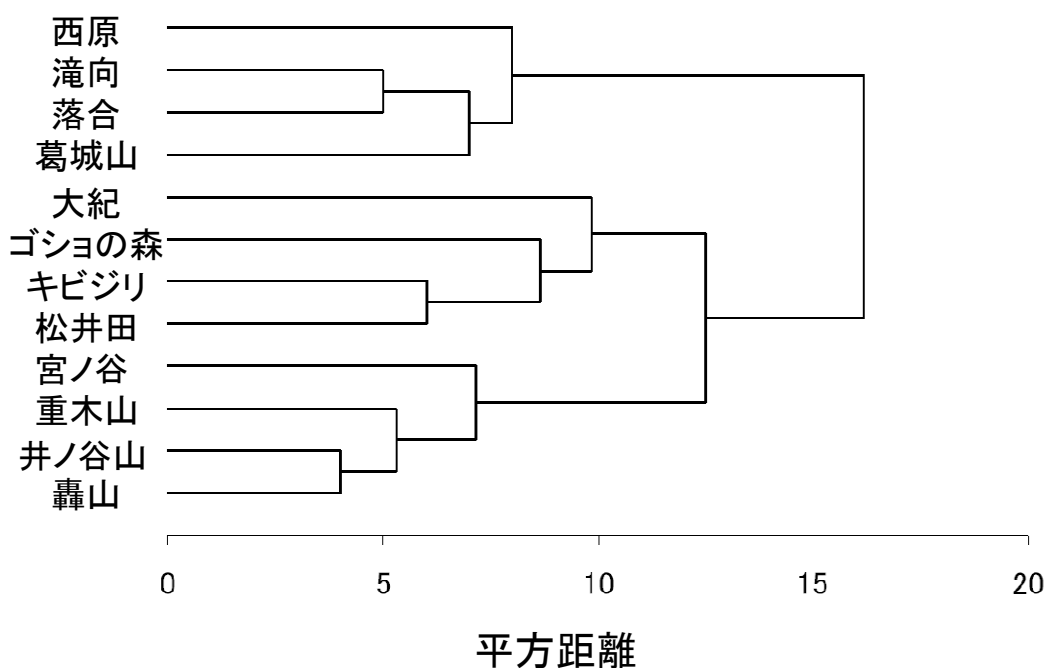


図-6.3 共通性の高いカテゴリーによるクラスター分析の結果(幹線の開設地点)

表-6.10 クラスターTAとTBの特性

	共通性の高いカテゴリー	共通性が低いカテゴリー
クラスターTAのみ	鋭い谷, 広い尾根	やや急(平均), 鋭い尾根, 凸, 等斉, やや凹, やや緩(下部), 中(下部), 崖錐の無
クラスターTBのみ	鋭い尾根, 等斉, 緩(下部)	
クラスターTA・TBに共通	緩(平均), やや緩(平均), やや凸	急(平均), 広い谷, 直線, 凹, 崩壊の無

次に、支線の開設地点では2つのクラスターに大別できた(図-6.4)。1つ目のクラスターは、西原、大紀、重木山の3地域(以下、クラスターSAとする)となり、それ以外の9地域(宮ノ谷、キビジリ、滝向、落合、ゴシヨの森、葛城山、井ノ谷山、松井田、轟山)が2つ目のクラスター(以下、クラスターSBとする)となった。共通性の高いカテゴリーは、クラスターSAでは平均傾斜のやや緩、広い谷、広い尾根、等斉、崖錐の無、0次谷の有の6種類で、クラスターSBでは平均傾斜の中、下部の傾斜の中、0次谷の無の3種類であり、その中で両者に共通しているカテゴリーは、1つもなかった。一方、共通性が低いカテゴリーは、クラスターSAでは平均傾斜の中、急、鋭い谷、直線、鋭い尾根、凸、やや凹、凹、下部の傾斜のやや緩、やや急、崖錐の有、0次谷の無、過去の崩壊の有の13種類で、クラスターSBは平均傾斜の緩、鋭い谷、広い尾根、下部の傾斜のやや緩、やや急、急、崖錐の無、0次谷の有、過去の崩壊の無しの9種類であり、その中で両者に共通しているカテゴリーは、鋭い谷、下部の傾斜の緩、やや急の3種類であった(表-6.11)。表-6.11からクラスターSAとクラスターSBとで平均傾斜の中や広い尾根、崖錐の無、0次谷の無で両者の重要度が逆転していることが分かる。支線は対象地全体に偏りなく開設されていることから、支線の開設地の地形的特徴は対象地全体の特性が表れていると考えられる。このことから、これを考慮すると、このような特性の違いが生じた要因は対象地全体の地形特性によるものと推測できる。そこで、対象地全体の地形特性のどの違いが、このような特性の差を生じさせたかを明らかにするために、様々な地形因子の組合せをクラスター分析した。ある地形特性の影響が図-6.4の違いを生じさせる要因であるならば、そこから得られた樹状図と図-6.4とは類似すると考えられることから、得られた樹状図と図-6.4とを比較した。その結果、斜面の鉛直形状(凸型斜面、等斉斜面、凹型斜面)と水平形状(尾根型斜面、直線斜面、谷型斜面)の比率(表-6.12)から得られた樹状図(図-6.5)が図-6.4と類似していた。図-6.5は2つのクラスターに大別でき、1つ目のクラスターは、西原、大紀、重木山と葛城山の4地域となり、それ以外の地域(宮ノ谷、キビジリ、滝向、落合、ゴシヨの森、井ノ谷山、松井田、轟山の8地域)が2つ目のクラスターとなった。図-6.4と図-6.5とを比較すると、葛城山以外の地域は同じクラスターに大別されていることが分かる。このことから、支線の開設地点が2種類のクラスターに分類される要因は、斜面の鉛直形状と水平形状の比率の可能性が考えられ、表-6.12から凹型斜面の割合が25%以下で、尾根型斜面が24%以下の地域における支線の判別に重要なカテゴリーはクラスターSAに、そうでない地域における支線の判別に用いられる共通性の高いカテゴリーはクラスターSBになることが分かる。

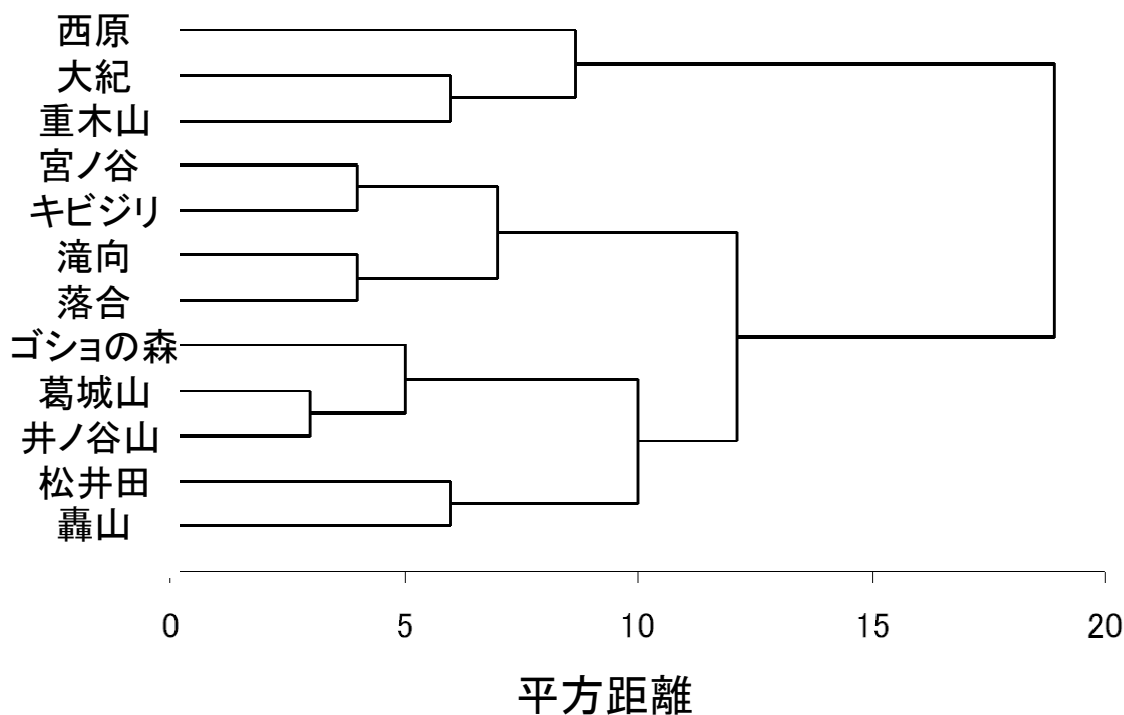


図-6.4 共通性の高いカテゴリによるクラスター分析の結果(支線の開設地点)

表-6.11 クラスタ-SA と SB の特性

	共通性の高いカテゴリ	共通性の高くないカテゴリ
クラスタ-SA のみ	やや緩(平均), 広い谷, 広い尾根, 等斉, 崖錐の無, 0次谷の有	中(平均), 急, 直線, 鋭い尾根, 凸, やや凹, 凹, 崖錐の有, 0次谷の無, 崩壊の有
クラスタ-SB のみ	中(平均), 中(下部), 0次谷の無	緩(平均), 広い尾根, 急(下部), 崖錐の無, 0次谷の有, 崩壊の無
クラスタ-SA・SB に共通		鋭い谷, やや緩(下部), やや急

表-6.12 対象地ごとの水平形状と鉛直形状の比率

	水平形状				鉛直形状	
	尾根	直線	谷	凸型斜面	等斉斜面	凹型斜面
キビジリ	27.9	45.4	26.7	30.9	32.9	36.2
ゴシヨの森	26.4	49.3	24.3	26.9	41.7	31.4
井ノ谷山	24.5	48.3	27.1	24.4	48.7	26.9
宮ノ谷	28.1	45.7	26.2	30.7	36.2	33.1
轟山	26.3	44.1	29.6	23.9	39.4	36.7
重木山	21.7	55.0	23.3	21.5	51.7	26.9
松井田	30.3	46.0	23.7	22.4	39.6	38.0
西原	19.1	61.7	19.2	23.5	53.8	22.6
大紀	18.9	63.6	17.4	17.4	60.8	21.8
葛城山	23.3	56.1	20.6	22.6	52.8	24.6
滝向	29.0	52.1	18.9	22.2	50.5	27.3
落合	32.2	50.6	17.2	23.2	46.3	30.5

(セル内の値は%を示す)

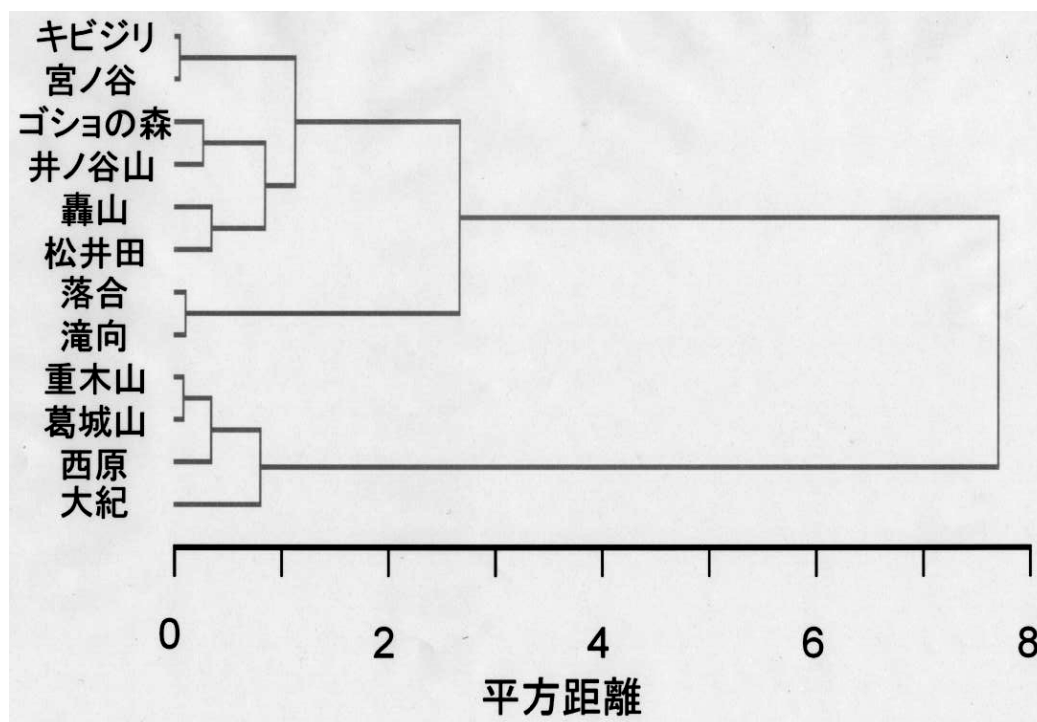


図-6.5 水平形状と鉛直形状の比率によるクラスター分析の結果

最後に、作設されていない地点のクラスター分析の結果を図-6.6 に示す。作設されていない地点では、3つのクラスターに大別できた。1つ目のクラスターは轟山、キビジリ、井ノ谷山、重木山、葛城山、宮ノ谷、松井田の7地域、2つ目のクラスターは大紀、西原の2地域、3つのクラスターはゴシヨの森、滝向、落合の3地域になった。しかし、これらを幹線や支線と同様に分析したものの、明確な特性を得ることができなかった。本研究では森林作業道が作設されていない地点を結論部と設定したため、そこから得られる条件にはたまたま森林作業道が開設していなかったことで得られた地形条件と、実際に設計者が開設地として避けたことで得られた条件の2種類が抽出されてしまう。明確な違いを得ることができなかったのは、上述した偶然抽出された条件によるものであると考えられる。そこで、本研究では偶然抽出された条件をふるいに掛けるため、表-6.18 で半数以上の地域で共通性の高いカテゴリーとし、その結果、図-6.1 に示した4属性に含まれており、平均傾斜の緩、鋭い谷、等斉の3種類が作設されていない地点を判断する上で重要となるカテゴリーとなった。

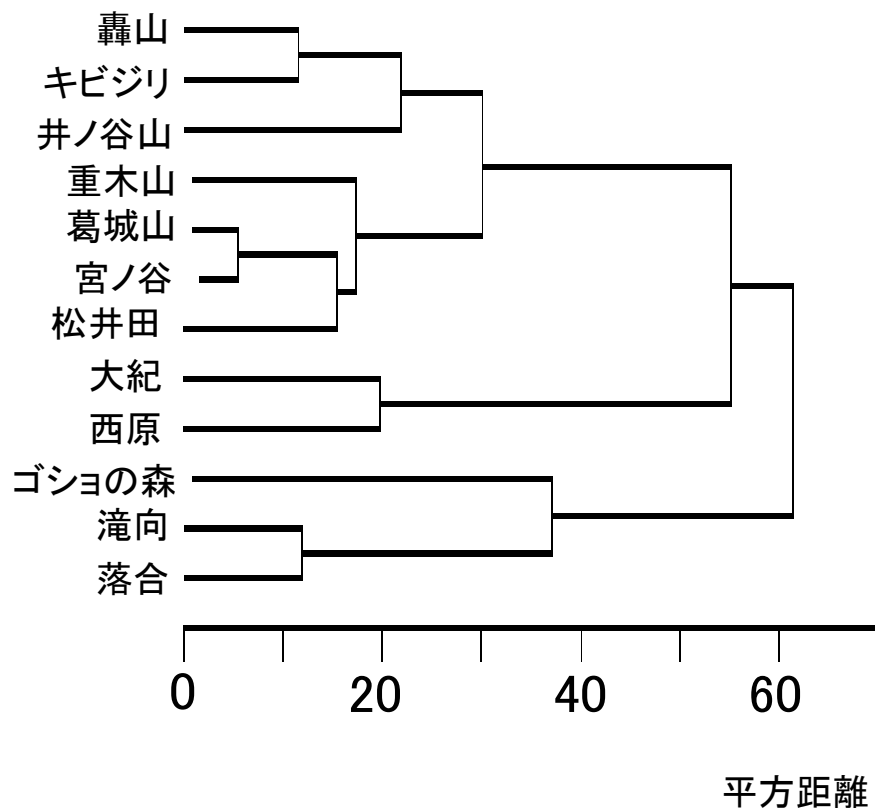


図-6.6 共通性の高いカテゴリーによるクラスター分析の結果(作設されていない地点)

6.3.3 地形カテゴリーの組合せに関する地形的特徴

実際に作成した組み合わせを表-6.13に示す。ただし、表-6.13では配分スコア、コラムスコアがしきい値以上であったもののみ記載している。表-6.13から抽出される共通性の高いカテゴリーの組み合わせを表-6.14に示す。同様に対象路網ごとに共通性の高いカテゴリーの組合せを抽出した。

カテゴリーの組合せ数は幹線の開設地点では8~17個、支線の開設地点では17~37個、作設されていない地点では18~48個得られた。ここから、共通性の高いカテゴリーの組合せの地形的特徴を明らかにするために、非類似度行列を作成して、クラスター分析を行い、似通ったグループごとに分類した。その結果を図-6.7~6.9に示す。幹線の開設地点では葛城山、大紀、落合、滝向、西原の5地域（以下、クラスターUAとする）とその他の7地域（ゴシヨの森、キビジリ、松井田、宮ノ谷、重木山、井ノ谷山、轟山をクラスターUBとする）との2つのクラスターに、支線の開設地点では西原、大紀、重木山の3地域（以下、クラスターVAとする）とそれ以外の9地域（宮ノ谷、キビジリ、滝向、落合、ゴシヨの森、葛城山、井ノ谷山、松井田、轟山を以下クラスターVBとする）との2つのクラスターに大別できた。作設されていない地点では、井ノ谷山、轟山の2地域と重木山、葛城山、キビジリ、落合、滝向の5地域、松井田、西原、ゴシヨの森、大紀、宮ノ谷の5地域の3つのクラスターに大別できた。幹線の開設地点と支線の開設地点にともに、図-6.3、6.4と同様の樹状図であることから、2クラスターに大別できたのは、幹線の開設地点は作設方法の違いが、支線は斜面の水平形状と鉛直形状の比率が要因であると考えられる。一方、作設されていない地点は図-6.6とは類似していなかった。これはたまたま森林作業道が開設していなかったことで得られた地形条件の影響を排除できなかったためと考えられる。

表-6.13 組み合わせ表(幹線の開設地点のキビジリ)

ただし、表中の黒いセルには数値が入らないことを示す

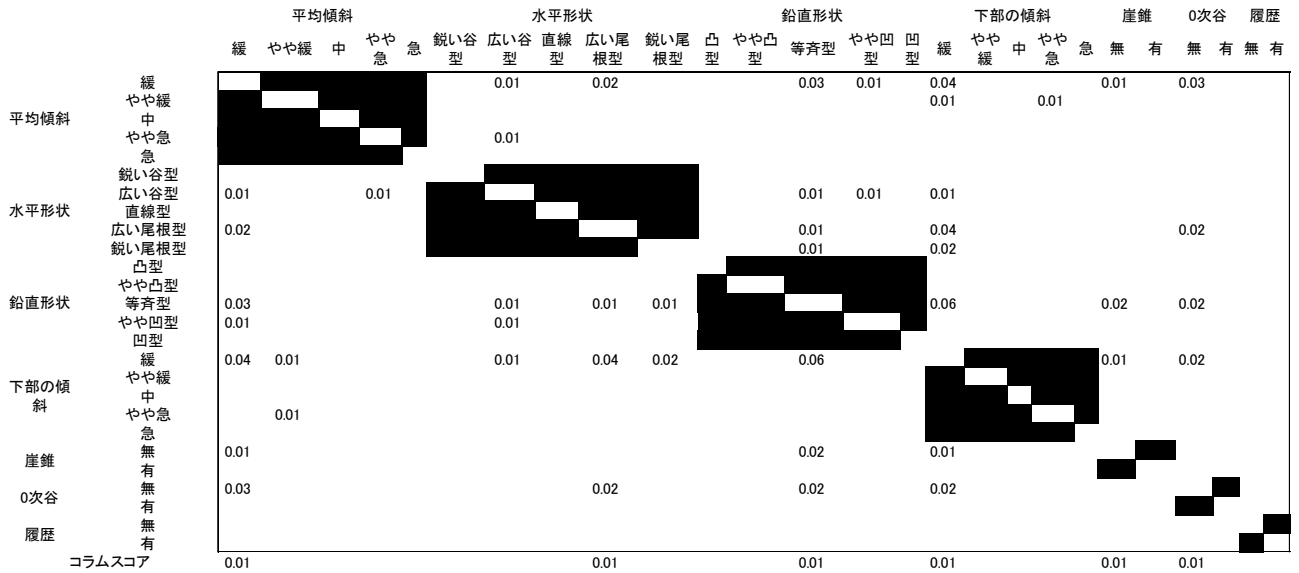


表-6.14 表-6.13 で重要となるカテゴリーの組み合わせ

傾斜	水平	鉛直形状	下部	崖錐	0次谷	過去の崩壊
やや緩	鋭い谷	等斉	緩	無	無	
やや緩	広い尾根	等斉	緩	無	無	
やや緩	広い谷	等斉	緩	無	無	
緩	鋭い谷	等斉	緩	無	無	
緩	広い尾根	等斉	緩	無	無	
緩	広い尾根	やや凹	緩	無	無	
緩	広い尾根	やや凹			無	
緩	広い尾根	やや凸			無	
緩	広い谷	等斉	緩	無	無	
緩	広い谷	やや凹	緩	無	無	
緩		等斉	緩	無		

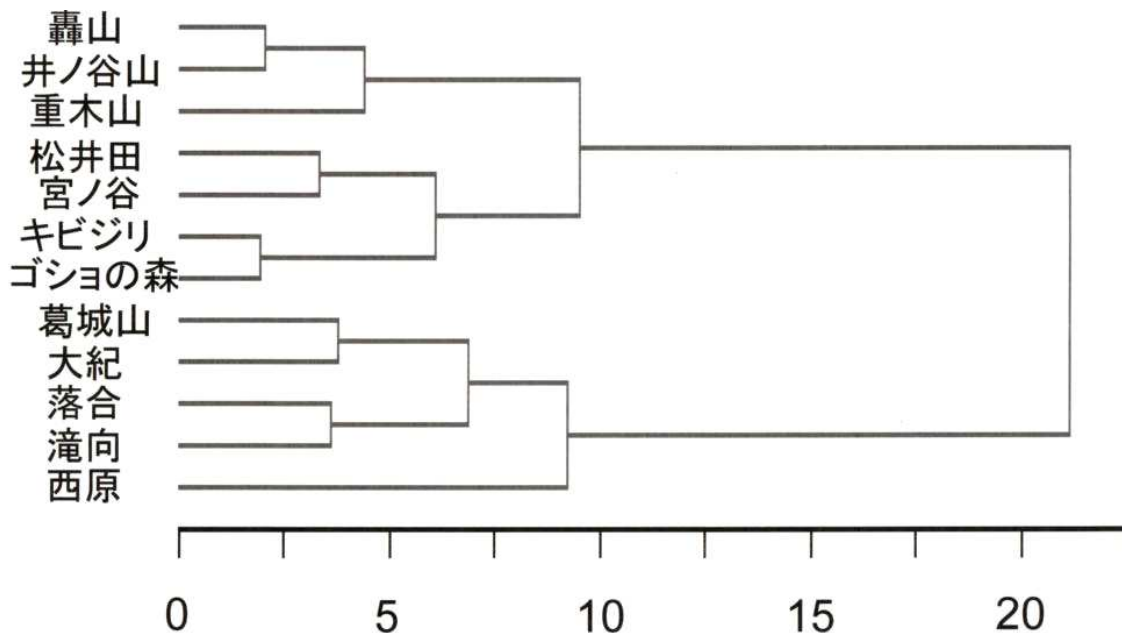


図-6.7 共通性の高いカテゴリーの組み合わせによるクラスター分析の結果(幹線の開設地点)

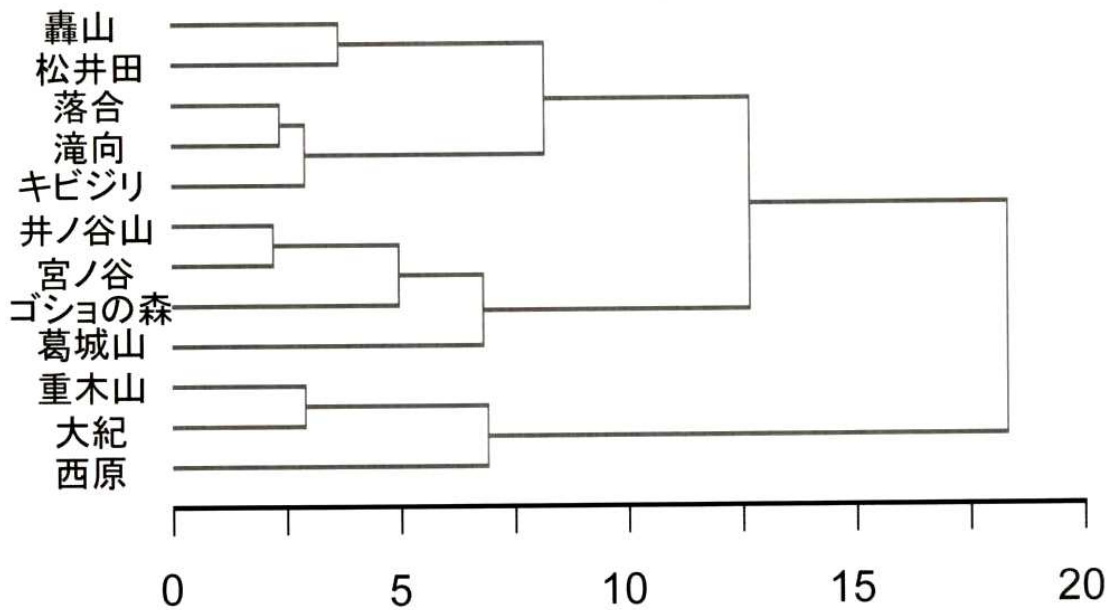


図-6.8 共通性の高いカテゴリーの組み合わせによるクラスター分析の結果(支線の開設地点)

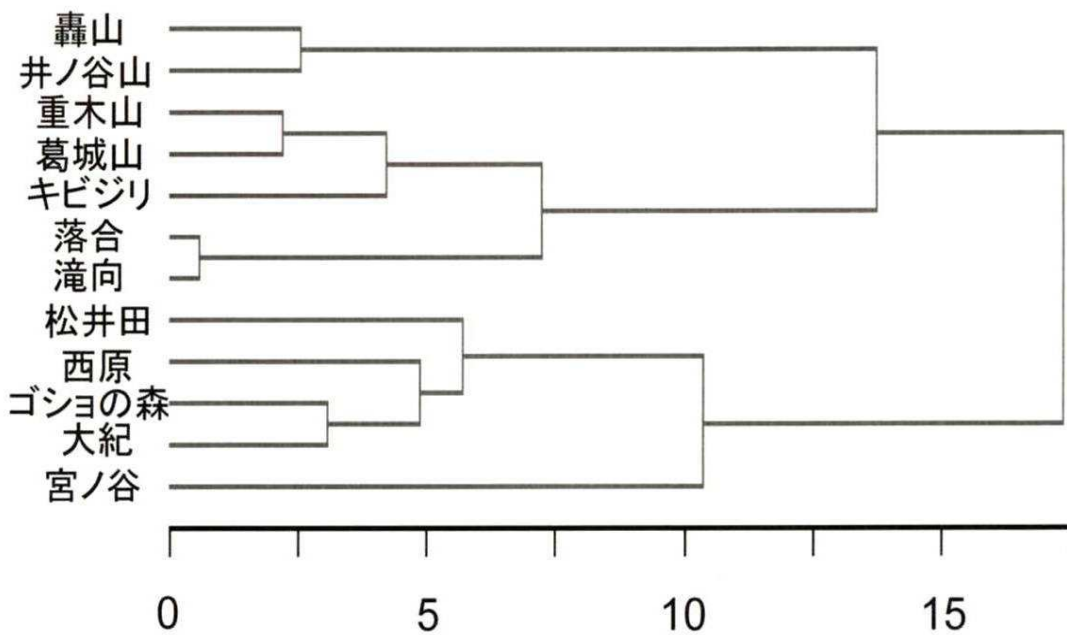


図-6.9 共通性の高いカテゴリーの組み合わせによるクラスター分析の結果(作設されていない地点)

結論部の判別に必要な選定条件を明らかにするために、幹線の開設地点と支線の開設地点では当該クラスターに含まれる地域から抽出された共通性の高いカテゴリーの組み合わせを含んでいる地域数を算出し、その値が当該クラスター内にある地域の半数以上であれば、そのカテゴリーの組み合わせを当該クラスターにおける選定条件とした。クラスターUA内にある地域から抽出された共通性の高いカテゴリーの組み合わせの中で、半数以上の地域で共通していた組み合わせは9種類、クラスターUB内では6種類、クラスターVAでは4種類、クラスターVBでは8種類となった(表-6.15)。なお、表-6.15内にある*は、結論部を判別するのに必要ではない属性、つまりその属性はどのような値または形状であっても構わないことを示している。表-6.15から、両クラスターとも平均傾斜、斜面の水平形状、斜面の鉛直形状、下部の傾斜の4因子の組合せが中心であり、これは図-6.1と一致する。表-6.15から、クラスターUAでの幹線の開設地の選定条件は、平均傾斜のやや緩と斜面の水平形状の鋭い谷または広い尾根の組み合わせが中心となっており、クラスターUBでは平均傾斜の緩またはやや緩いと斜面の水平形状の鋭い尾根との組み合わせが中心となっていることが分かる。一方、クラスターVAでの支線の開設地の選定条件は平均傾斜のやや急と斜面の鉛直形状の等斉の組み合わせが中心となっており、クラスターVBでは平均傾斜の中と斜面の水平形状の広い谷または広い尾根、平均傾斜のやや急と斜面の水平形状の広い谷との組み合わせが中心となっていることが分かった。

表-6.15 各クラスターでの選定基準

	選定基準						
	平均傾斜	水平形状	鉛直形状	下部の斜面	崖錐	0次谷	過去の崩壊
クラスターUA	やや緩	鋭い谷	凸	*	*	*	*
	やや緩	鋭い谷	やや凸	*	*	*	*
	やや緩	鋭い谷	やや凹	*	*	*	*
	やや緩	広い尾根	やや凸	*	*	*	*
	やや緩	広い尾根	等斉	*	*	*	*
	やや緩	広い尾根	凸	*	*	*	*
	中	広い尾根	やや凸	*	*	*	*
	*	広い尾根	凸	*	*	*	*
クラスターUB	*	広い尾根	やや凸	*	*	*	*
	緩	鋭い尾根	やや凸	*	*	*	*
	やや緩	鋭い尾根	凸	中	*	*	*
	やや緩	鋭い尾根	凸	やや急	*	*	*
	やや緩	鋭い尾根	やや凹	やや緩	*	*	*
	やや緩	鋭い尾根	やや凹	緩	*	*	*
クラスターVA	*	鋭い尾根	凸	やや緩	*	*	*
	やや急	鋭い谷	等斉	*	*	有	*
	やや急	広い谷	等斉	*	無	*	*
	やや急	直線	等斉	*	無	*	*
クラスターVB	やや急	広い尾根	等斉	*	無	*	*
	中	広い谷	やや凸	中	*	*	*
	中	広い谷	等斉	中	*	*	*
	中	広い谷	やや凹	緩	*	*	*
	中	広い尾根	やや凹	中	*	*	*
	中	広い尾根	*	緩	*	*	*
	やや急	広い谷	やや凸	やや急	*	*	*
	やや急	広い谷	等斉	緩	*	*	*
やや急	広い谷	やや凹	中	*	*	*	

*はどのようなカテゴリーでもよいことを示している

一方、作設されていない地点では、そこから得られる条件にはたまたま作業道が開設してなかったために、抽出された地形条件と実際に設計者が開設地として避けたことで得られた地形条件（開設不適地）の2種類が抽出されてしまう。開設不適地はどの森林作業道でも得ることができる、すなわち共通性が高いと考えられることから、対象地の半数以上の地域で抽出された条件を開設不適地の地形条件と考え、それを抽出した。表-6.16 から得られた条件は6種類であり、鋭い谷と等斉の組合せに関する条件が2種類、崖錐に関する条件が3種類、0次谷に関する条件であった。表-6.8 で得られた共通性の高いカテゴリーは、平均傾斜の緩、鋭い谷、等斉の3種類であったが、開設不適地の地形条件にはこの3種類以外にも平均傾斜の急や崖錐の有、0次谷の有があることが分かった。

以上のことから、熟練の技術者の経験的知識によって行われている選定条件の中で、開設地の判別に持ち入れられる共通性の高い条件を明確にした。幹線の開設地の選定で持ち入れられる共通性の高い条件は

地域によって2つに分類でき、1つは平均傾斜のやや緩と斜面の水平形状の鋭い谷または広い尾根の組み合わせが中心であり、もう一方は平均傾斜の緩またはやや緩いと斜面の水平形状の鋭い尾根との組み合わせが中心であった。また、支線の開設地の選定で用いられる共通性の高い条件は斜面の水平形状と鉛直形状の比率によって2つに分類でき、凹型斜面の割合が25%以下で、尾根型斜面が24%以下の地域では平均傾斜のやや急と斜面の鉛直形状の等斉の組み合わせが中心であり、そうでない地域では平均傾斜の中と斜面の水平形状の広い谷または広い尾根、平均傾斜のやや急と斜面の水平形状の広い谷との組み合わせが中心であった。開設不適地では、全地域共通の6つの地形条件を得ることができた。

表-6.16 開設不適地で重要となるカテゴリーの組合せ

平均傾斜	選定基準					
	水平	鉛直	下部	崖錐	0次谷	過去
緩	鋭い谷	等斉	緩	*	*	*
やや緩	鋭い谷	等斉	やや緩	*	*	*
中	*	凹	*	有	*	*
やや急	*	凹	*	有	*	*
急	*	凹	*	有	*	*
急	広い谷	やや凸	急	*	有	*

6.4 共通性の高い条件と経験的知識との比較

ここでは、経験的知識に基づいて、作業道の開設地を選定して作設している代表例として、葛城山や西原の大橋式作業道（大橋ら 2007）と、四万十町の四万十式作業道（田邊ら 2007）とを取り上げ、それらの選定条件を明確にする。大橋式作業道（大橋ら 2007）は、尾根に幹線を開設することを基本としており、まず谷から開設していき、「タナ」地形を選択しながら、等高線に沿って尾根に達すると

している。これを大橋式作業道の葛城山と西原が含まれているクラスターUAの選定条件と比較すると、クラスターUAの選定条件は、平均傾斜のやや緩いと斜面の水平形状の鋭い谷または広い尾根、斜面の水平形状の広い尾根と斜面の鉛直形状のやや凸の組み合わせである。すなわち、大橋式作業道において開設適地といわれている谷と尾根は、ここで分類したカテゴリーのうち、鋭い谷と広い尾根に対応する。このように、鋭い谷、広い尾根、平均傾斜、斜面の鉛直形状の組み合わせによって、大橋式作業道の経験的知識による選定条件を説明することが可能である。

一方、四万十式作業道（田邊ら 2007）は、幹線の開設地として、尾根を勧めており、谷をなるべく避けるようすべきとしている。これを四万十町の地域がすべて含まれるクラスターUBの選定条件と比較すると、谷はなく、鋭い尾根が条件である。すなわち、四万十式作業道の開設適地である尾根は、ここで分類したカテゴリーの鋭い尾根に対応する。このように、鋭い尾根と平均傾斜や斜面の鉛直形状の組み合わせによって、四万十式作業道の経験的知識による選定条件を説明することが可能である。

一方、大橋式作業道や四万十式作業道では両者ともに崖錐や0次谷を避けるべきとしている。表-6.16の開設不適地の選定で重要となる条件の中で、崖錐に関する条件が3種類、0次谷に関する条件が1種類含まれており、大橋式作業道や四万十式作業道で避けるべき地形は、これらの条件のことを示していると考えられる。

以上から、経験的知識のうち、幹線の選定条件では平均傾斜や斜面の水平形状と鉛直形状の組み合わせであることが、支線の選定条件では崖錐は他の地形因子との組み合わせで必要であることが分かった。しかし、経験的知識による選定条件は、流れ盤や受け盤、リニアメントといった地質の構造や地下水の流路、湧水点といった地下水の動態も考慮していることから、上述した選定条件だけでなく、他の因子も分析する必要がある。

6.5 まとめ

ラフ集合理論から抽出した選定条件から、熟練した技術者が選定で必要とされる地形因子やカテゴリー、そのカテゴリーの組合せを明らかにすることができた。これらの結果によって、感覚的であった森林作業道の適地、不適地の選定が容易に行えることが期待できる。しかし、この得られた条件が明らかとなった地域でも適用できるかは明らかになっていない。そこで、第七章では第六章で得られた共通性の高いカテゴリーの組合せ（条件）の適用可能性について検討する。

また、本研究の目的は各技術者の経験的知識を明確にすることであり、明確になった条件が物理的に堅固な場所であるかは明らかにできていない。そのため、今後の課題としては得られた地形条件が実際、

物理的に堅固な場所であるか検証する必要がある。

7章 選定条件の適用可能性

7.1 はじめに

経験的知識によって行われる森林作業道の開設地の選定条件を明らかにするために、第六章では熟練した技術者が判別に用いている条件を明らかにし、さらにクラスター分析することで、その条件を2つのグループに大別し、さらにそれぞれの適用できる地域を明らかにした。しかし、この得られた条件に該当する地点に実際の森林作業道が開設されているかどうかは分かっていないとともに、大別できた2つのグループはラフ集合理論に適用した12森林作業道から得られたものであり、他のどの地域にも適用できるかについては明らかになっていない。経験の浅い技術者が容易に森林作業道の設計を行うには、この得られた条件の適用可能性について検討する必要がある。そこで、本章では選定条件の抽出に用いた12森林作業道を対象に、第六章で得られた条件を再度適用し、各条件に該当する地点に森林作業道が開設されているかを表す選択性を明らかにするとともに、選定条件に用いていない2森林作業道を対象に条件を適用し、各条件の汎用性を明らかにすることを目的とする。

7.2 評価方法

まず、本章では第六章で得られた条件に該当する地点を候補地と定義し、幹線および支線の候補地を森林作業道の開設適地の候補地、開設不適地の候補地を開設不適地の候補地と表わす。

7.2.1 選択性の評価方法

開設適地の候補地が実際の森林作業道の開設地として、選ばれている場合、対象地全体に対する開設適地の候補地の割合よりも開設適地の候補地に森林作業道が開設されている割合の方が大きくなると考えられる。一方、開設不適地の候補地が森林作業道の開設できない場所として、避けられている場合、開設不適地の候補地に森林作業道が開設されている割合は0で、対象地全体に対する開設不適地の候補地の割合よりも開設不適地の候補地に森林作業道が開設されている割合は小さくなると考えられる。このことから、対象地全体に対する各候補地の割合と各候補地に森林作業道が開設されている割合から、各候補地の選択性を評価する。

抽出した条件に該当する地点の抽出方法は、これまでと同様に ArcGIS を用いて、10 m メッシュごとに行い、ラフ集合理論に用いた12森林作業道を対象に選択性の評価を行う。

7.2.2 汎用性の評価方法

汎用性が高い場合、第六章で得られた地域に条件を適用しても、選定条件の抽出に用いた 12 森林作業道と同様の選択性を示すと考えられる。そこで、ここでは第六章で得られた条件を選定条件に適用していない森林作業道に適用し、対象地全体に対する各候補地の割合と各候補地に森林作業道が開設されている割合を算出し、その割合と選定条件の抽出に用いている 12 森林作業道から得られた割合から、汎用性を評価する。汎用性の検証に用いる森林作業道は、第五章で示した森林作業道の 5 つの条件を満たす高知県土佐山田と山梨県上帯那の 2 地域（図-7.1, 7.2）とする。両対象地の概要を表-7.3 に示す。表-7.1 から、対象地の傾斜は約 27 度であり、それぞれに該当するクラスターは上帯那の幹線ではクラスターUA、支線ではクラスターVA、土佐山田の幹線ではクラスターUB、支線では VB である。

図-7.1 適用可能性の検証に用いる対象地の概要

対象地		面積 (ha)	路網密度 (m/ha)	傾斜 (度)	適用 クラスター	
					幹線	支線
山梨県	上帯那	114.0	81.7	27.1	UA	VA
高知県	土佐山田	391.6	105.0	27.8	UB	VB

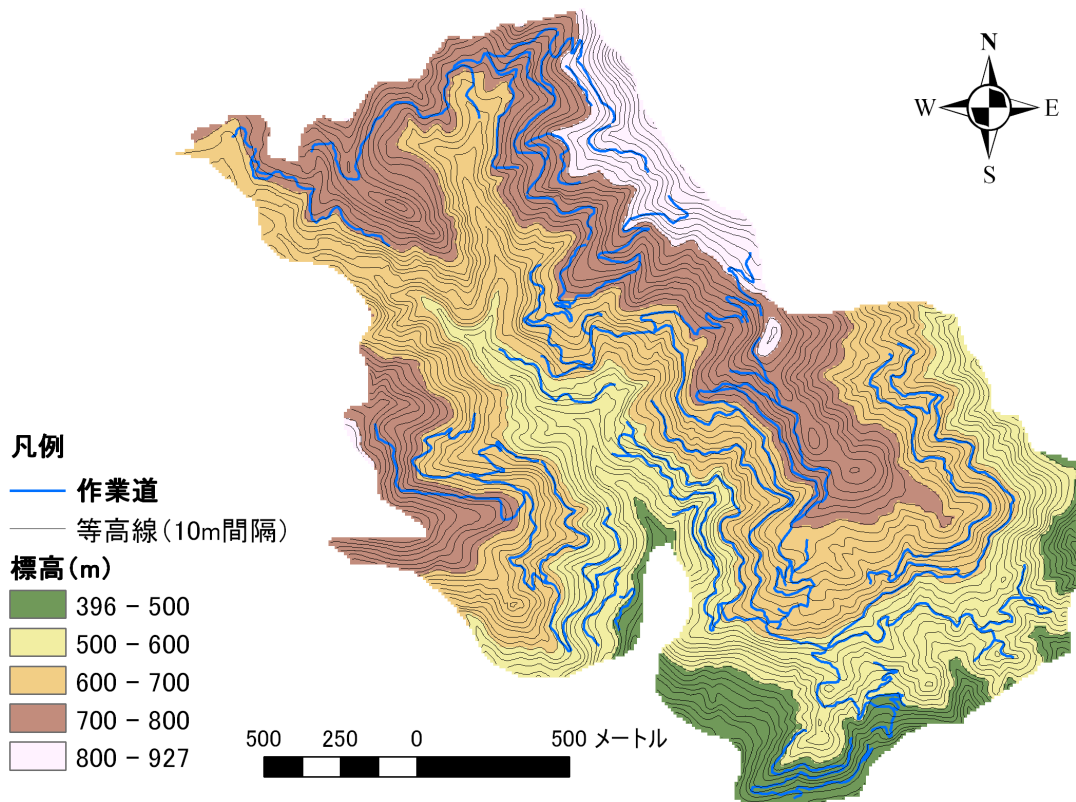


図-7.1 土佐山田の路網の平面図

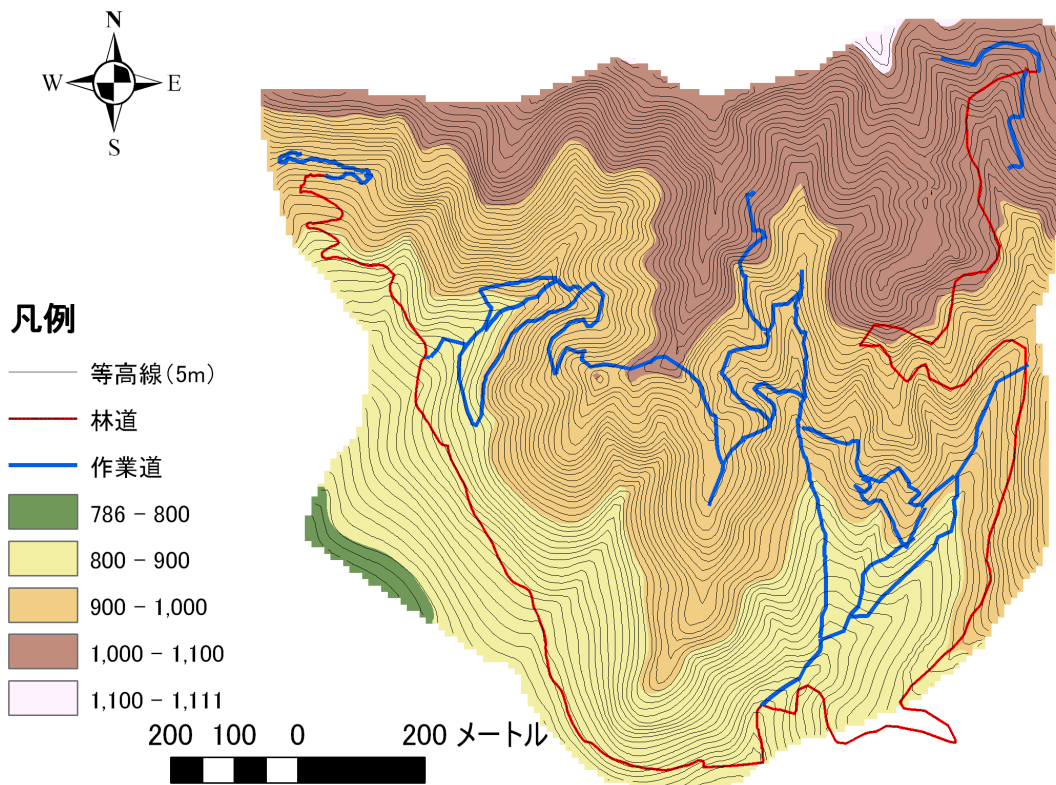


図-7.2 上帯那の路網の平面図

7.3 分析結果

7.3.1 選択性の評価

まず、開設適地がどの程度、存在しているかを明らかにするために、対象地全体に対する幹線と支線の候補地の割合を示す（図－7.3）。図－7.3 から幹線の候補地は全体の1～8 %、支線では6～20 %、開設不適地では0.1～6 %の範囲になった。開設不適地の割合が低いのは、開設不適地の条件数が6と少ないことと、全体に対する0次谷や崖錐の割合はもともと小さためであると考えられる。次に、森林作業道総延長に対する各候補地に作設された森林作業道の割合を図－7.4に示す。図－7.4 から、幹線の候補地は1～15 %、支線では15～30 %、開設不適地では1 %の滝向を除いて、他の地域では0%になっていた。

開設適地の選択性を明らかにするために、両者の比率（表－7.2）の差の検定を有意水準5 %で行ったところ、重木山、宮ノ谷、大紀の幹線の候補地と松井田、西原の支線の候補地以外で有意差を得た。有意差を得た割合の中で、大紀の支線の候補地以外は森林作業道総延長に対する割合の方が対象地全体に対する割合より高いことから、多くの地域で熟練した技術者は開設適地の候補地を選択していることが分かる。一方、開設不適地の選択性は、森林作業道総延長に対する開設不適地の候補地に作設された森林作業道の割合が滝向以外で0 %であり、その滝向も1%であることから、開設不適地の候補地に森林作業道が開設されていないことが分かる。

以上のことから、有意差を得られなかった地域や森林作業道総延長に対する割合の方が有意に低い地域もあったが、多くの地域では開設適地の候補地を熟練した技術者は選択しており、また開設不適地の候補地を選択していないことが分かった。

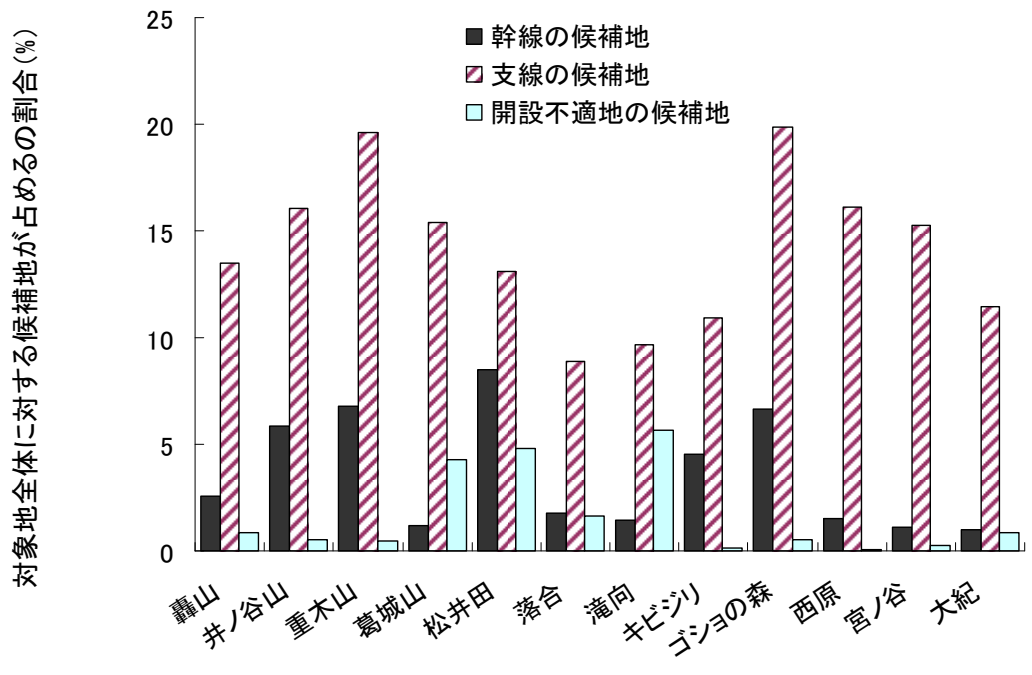


図-7.3 対象地全体に対する各候補地が占める割合

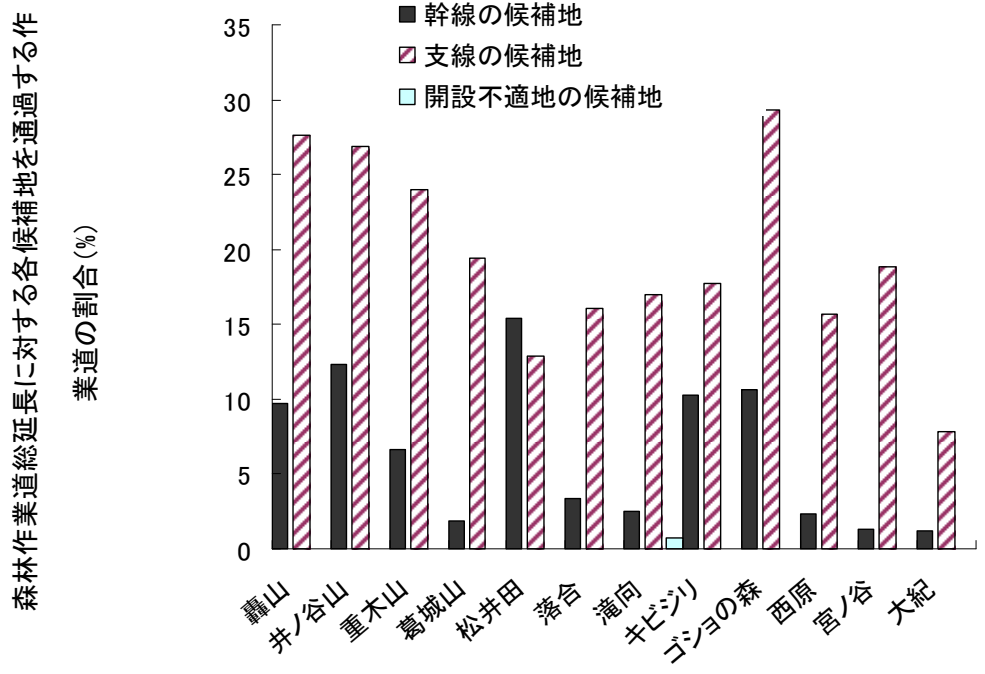


図-7.4 森林作業道総延長に対する各候補地を通過する作業道の割合

表-7.2 候補地別の全体に対する割合と森林作業道に対する割合

*は有意水準 5 % で有意差を得た地域

	幹線の候補地		支線の候補地	
	全体に対する割合(%)	森林作業道に対する割合(%)	全体に対する割合(%)	森林作業道に対する割合(%)
轟山	2.6	9.8*	13.5	27.7*
井ノ谷山	5.9	12.4*	16.1	26.9*
重木山	6.8	6.7	19.7	24.0*
葛城山	1.2	2.0*	15.5	19.5*
松井田	8.5	15.4*	13.2	12.9
落合	1.8	3.4*	8.9	16.1*
滝向	1.5	2.6*	9.7	17.1*
キビジリ	4.6	10.3*	11.0	17.8*
ゴシヨ	6.7	10.7*	19.9	29.3*
西原	1.6	2.4*	16.2	15.7
宮ノ谷	1.2	1.3	15.3	18.9*
大紀	1.0	1.2	11.5	7.9*

7.3.2 汎用性の評価

まず、開設適地の候補地に森林作業道が開設されている割合と対象地全体に対する開設適地の候補地の割合との関係を図-7.5 に示す。なお、図-7.5 中の丸で示したのが汎用性の検証に用いた上帯那と土佐山田のデータとなる。この図から、幹線、支線に関わらず、ラフ集合理論に用いた 12 森林作業道と汎用性の検証に用いた 2 森林作業道は同じ範囲にある。さらに、ラフ集合理論に適用していない 2 地域でも森林作業道総延長に対する割合が高く、選択性で得られた有意差を得ている（表-7.3）。このことから、開設適地の汎用性は高いと考えられる。次に、開設不適地の候補地に森林作業道が開設されている割合を図-7.6 に示す。図-7.6 より、汎用性に用いた 2 地域において、土佐山田では 0% になっており、候補地に森林作業道が開設されていないが、上帯那では 5% ではあるものの、候補地に森林作業道が通過している。そこで、上帯那において、どこの開設不適地の候補地に森林作業道が通過しているかを明らかにするために、森林作業道と開設不適地の候補地との位置関係を図にしたところ（図-7.7）、候補地を通過している森林作業道は丸で囲ってある 2 つの路線であった。そこで、この 2 つの路線の作設理由を明らかにするために、設計者に聞き取り調査を行ったところ、この 2 つの路線は設計者が開設する以前からあったもので、設計者自身が開設したものではないことが明らかとなり、さらにもしこの 2 つの路線がなければ、設計者はこのような場所には森林作業道を作設しないことがわかった。このことか

ら、これら2本の路線を除いて通過した割合を算出したところ、割合は5%から0%に減少した。このことから、開設不適地の汎用性は高いと考えられる。

表-7.3 汎用性の検証に用いた森林作業道での候補地別の全体に対する割合と森林作業道に対する割合

*は有意水準5%で有意差を得た地域

	幹線の候補地		支線の候補地	
	全体に対する割合	森林作業道に対する割合	全体に対する割合	森林作業道に対する割合
上帯那	3.9	8.1*	6.0	14.0*
土佐山田	4.4	5.3*	8.0	15.5*

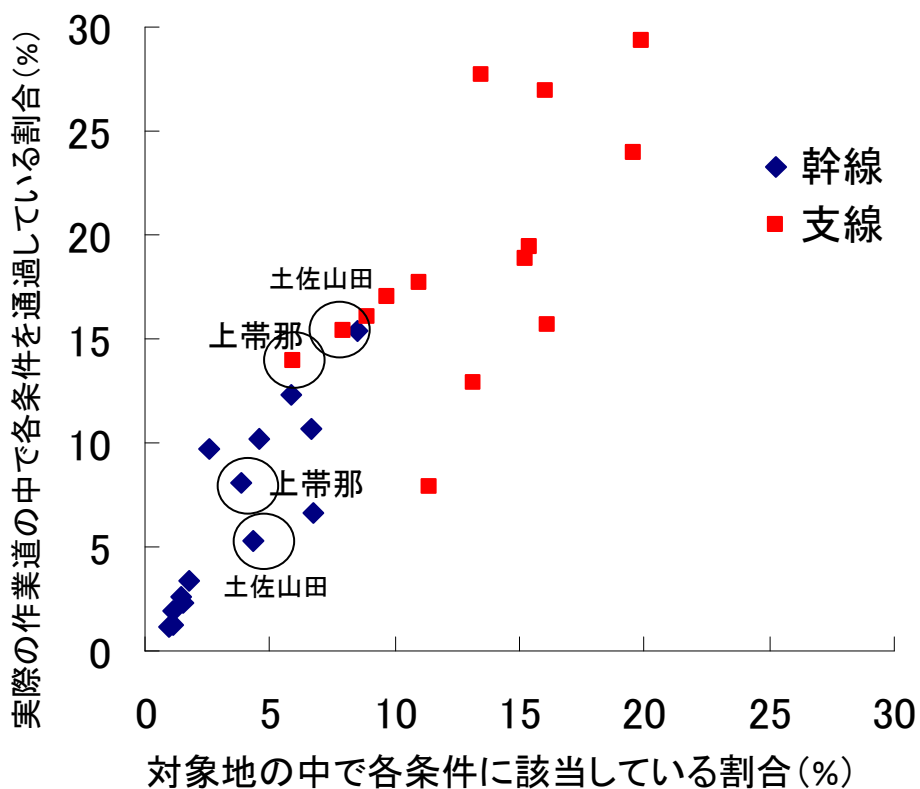


図-7.5 対象地全体に対する開設不適地の候補地が占める割合

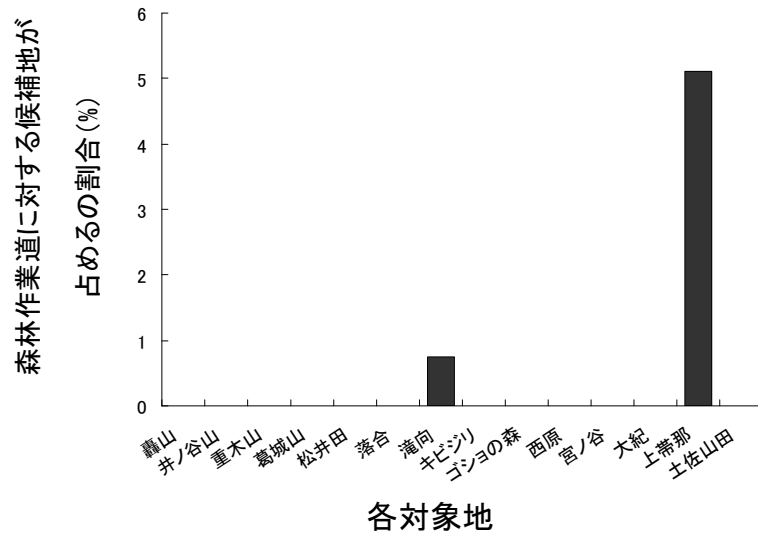


図-7.6 森林作業道に対する開設不適地の候補地が占める割合

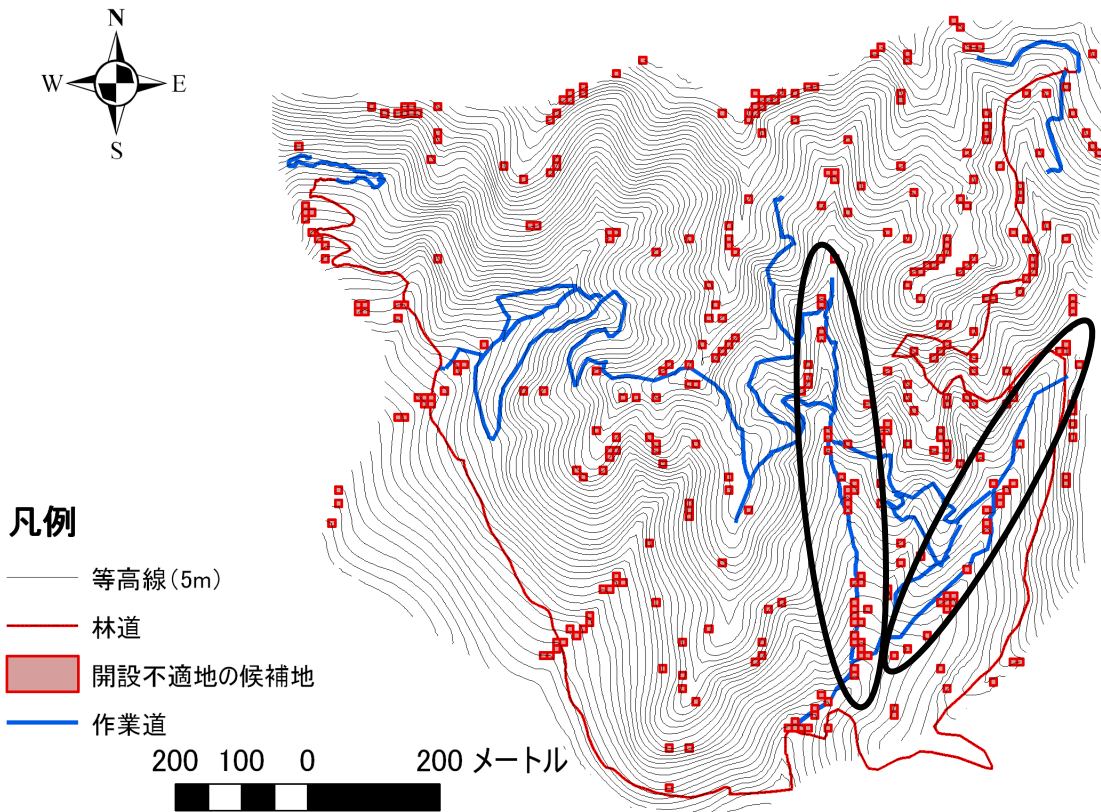


図-7.7 上帯那での開設不適地の候補地と実際の森林作業道との位置関係

7.4 開設適地の条件と抽出率との関係

経験の浅い技術者でも容易に森林作業道の設計を行うには、開設には避けるべき地点と開設に適した地点とを明確にすることがある。選択性の結果から、開設不適地の候補地は避けられていることが分かったが、開設適地の候補地は選択されているものの、森林作業道総延長に対する開設適地の候補地に作設された森林作業道の割合は最大でも 30%であった。経験の浅い技術者でも容易に森林作業道の設計を行うには、森林作業道総延長に対する開設適地の候補地に作設された森林作業道の割合が高いほうがよいと考えられる。この割合を高めるには、開設適地の候補地を増やす必要がある。これまで、クラスター分析によって大別したクラスター内の半数以上の地域で得られた条件を用いて、その割合を算出していた。そこで、ここではより条件数を増やすことでこの割合がどのように変化するかを明らかにし、それらの条件を熟練した技術者は本当に選択しているかを明らかにする。分析に用いる幹線と支線の条件は、クラスター分析で大別したグループの中で、複数の地域で共通となった条件とする。この条件に該当する地点を候補地として抽出し、森林作業道総延長に対する開設適地の候補地に作設された森林作業道の割合を算出する。さらに、対象地全体に対する新たに抽出した開設適地の候補地の割合と森林作業道総延長に対する開設適地の候補地に作設された森林作業道の割合との比率の差の検定を行い、熟練した技術者はその条件を本当に選択しているかを明らかにする。

まず、複数の地域で共通となった条件数（表-7.4）はクラスターUAで4、クラスターUBで3、クラスターVAで2、クラスターVBで5となった。対象地全体に対する幹線と支線の候補地の割合（図-7.8）と各候補地に作設された森林作業道と森林作業道総延長との割合（図-7.9）に示す。なお、図中ではクラスター内の半数以上の地域で得られた共通性の高い条件の場合の割合を主要条件と表し、複数の地域で共通となった条件の場合の割合を追加条件と表している。幹線の候補地、支線の候補地ともに条件を追加することによって、対象地に対する割合は増加している。さらに、森林作業道総延長に対する割合は、これまでは幹線では1~15%、支線では15~30%であったが、条件を追加することで、幹線では2~19%、支線では17~40%になった。このことから、この割合は向上したものの、ラフ集合理論とコラムスコア法で得た条件では50%以上にならないことが明らかになった。第四章のラフ集合理論の適用可能性の検討の図-5.28で示されているとおり、ラフ集合理論では幹線や支線の判別割合は約6割であるため、この割合がラフ集合理論とコラムスコア法を用いた本研究の最大値になると考えられる。次に、追加した条件に該当する地点を開設地として、技術者は選択しているかを明らかにするために、両者の比率（表-7.5）の差の検定を有意水準5%で行った（表-7.5）。その結果、有意差がなかった地域が多くあり、幹線の候補地の大紀では有意差はあるものの、森林作業道に対する割合の方が

低くなっていた。

以上のことから、複数の地域で共通となった条件を追加することによって、候補地に作設された森林作業道と森林作業道総延長との割合の向上を目指したところ、その割合は向上したものの、それでも森林作業道を開設できる地点の多くを見落としている。さらに、熟練した技術者は追加した条件に該当する地点を選択している傾向がない地域もあり、追加した条件は第五章で得られた共通性の高い条件ほど熟練した技術者には選択されておらず、これがラフ集合理論とコラムスコア法を用いた本研究での開設適地の検出率の限界であると考えられる。このことから、第六章で得られた共通性の高い条件において、開設適地の候補地は開設地として選択され、不適地の候補地は避けられ、また両候補地の汎用性は高いことが確認できたが、表-7.3 で得た条件では、そのような選択性や汎用性は得ることができなかった。

表-7.4 追加する条件

上表から順にクラスターUA, UB, VA, VB の条件を示している

平均傾斜	水平形状	鉛直形状	下部の傾斜	崖錐	0次谷	過去の崩壊
中	鋭い谷	やや凸	*	*	*	*
中	鋭い谷	凸	*	*	*	*
中	広い尾根	やや凹	やや緩	*	*	*
中	広い尾根	等斉	やや緩	*	*	*

平均傾斜	水平形状	鉛直形状	下部の傾斜	崖錐	0次谷	過去の崩壊
やや緩	鋭い谷	やや凹	緩	*	*	*
緩	鋭い谷	やや凸	やや緩	*	*	*
緩	鋭い尾根	やや凹	*	*	*	*

平均傾斜	水平形状	鉛直形状	下部の傾斜	崖錐	0次谷	過去の崩壊
緩	広い尾根	等斉	緩	*	*	*
やや緩	広い尾根	やや凸	*	*	*	*

平均傾斜	水平形状	鉛直形状	下部の傾斜	崖錐	0次谷	過去の崩壊
中	直線	やや凹	中	*	*	*
やや急	直線	やや凹	やや急	*	*	*
緩	広い谷	やや凸	中	*	*	*
中	広い谷	やや凹	*	*	*	*
やや急	鋭い谷	やや凹	*	*	*	*

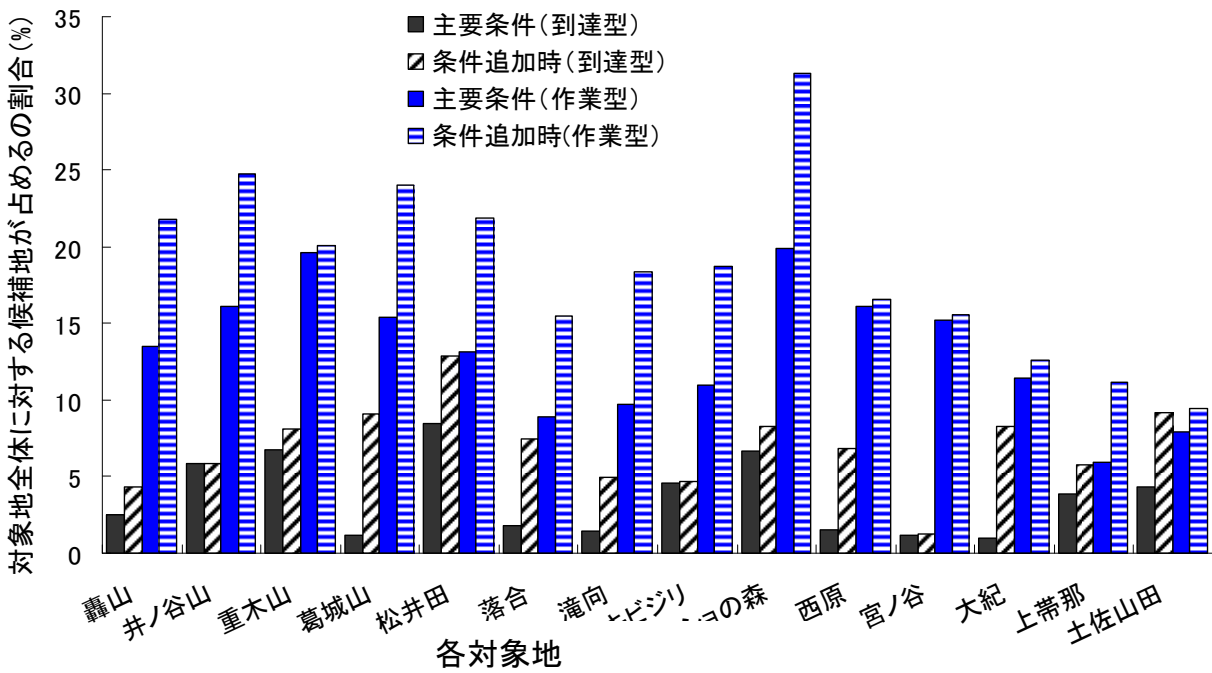


図-7.8 追加条件での対象地全体に対する各候補地が占める割合

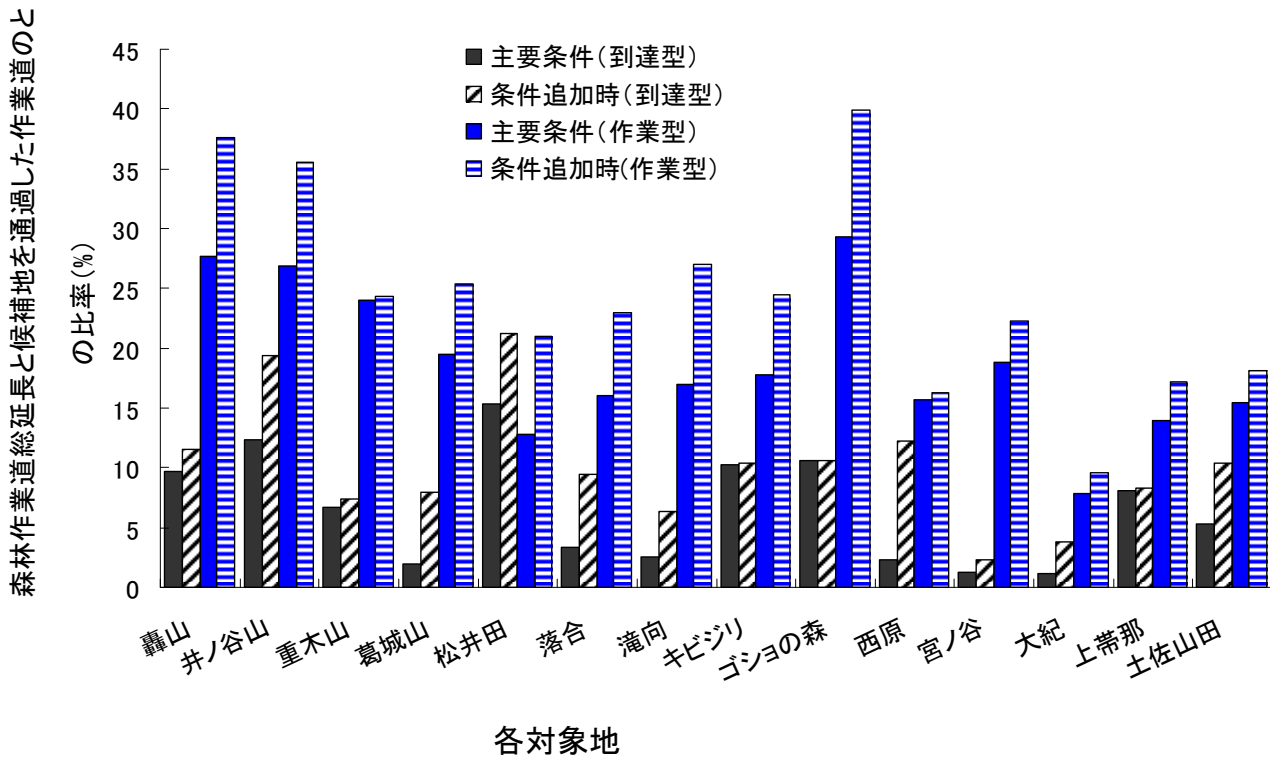


図-7.9 追加条件での森林作業道に対する各候補地が占める割合

表-7.5 候補地別の全体に対する割合と森林作業道に対する割合(条件追加時)

*は有意水準 5%で有意差を得た地域

	幹線の候補地		支線の候補地	
	全体に対する割合(%)	森林作業道に対する割合(%)	全体に対する割合(%)	森林作業道に対する割合(%)
轟山	4.4	11.6*	21.8	37.7*
井ノ谷山	5.9	19.4*	24.8	35.6*
重木山	8.1	7.5	20.1	24.4*
葛城山	9.2	8.0	24.1	25.5
松井田	12.9	21.2*	22.0	21.1
落合	7.5	9.5	15.5	23.0*
滝向	5.0	6.4	18.4	27.0*
キビジリ	4.7	10.5*	18.7	24.5*
ゴシヨ	8.3	10.7	31.4	40.0*
西原	6.9	12.3*	16.6	16.4
宮ノ谷	1.3	2.4*	15.6	22.3*
大紀	8.3	3.9*	12.7	9.6*
上帯那	5.8	8.4*	11.2	17.2*
土佐山田	9.2	10.5*	9.5	18.2*

7.5 おわりに

第六章で得られた共通性の高い条件の選択性と汎用性を評価した。その結果、開設適地に該当する地点に森林作業道は開設されており、不適地に該当する地点には開設されていないことが、開設適地と不適地の汎用性は高いことが分かった。これを用いることで、開設適地と不適地の候補地を図示することができ、開設できる尾根や谷、できない尾根や谷を目視で理解できる。例えば、図-7.10 に示す轟山では標高が高いところにある主要な尾根があり、そこから標高が低いほうへつらなる支尾根が 2 つある。その支尾根は幹線の候補地である緑のメッシュが多くつらなっている一方で、最も西にある谷では開設不適地を示す赤のメッシュが多くある。このように開設適地と不適地の候補地を可視化することで、森林作業道の開設地の目安ができ、これは経験の浅い技術者にとっては役立つものと期待される。

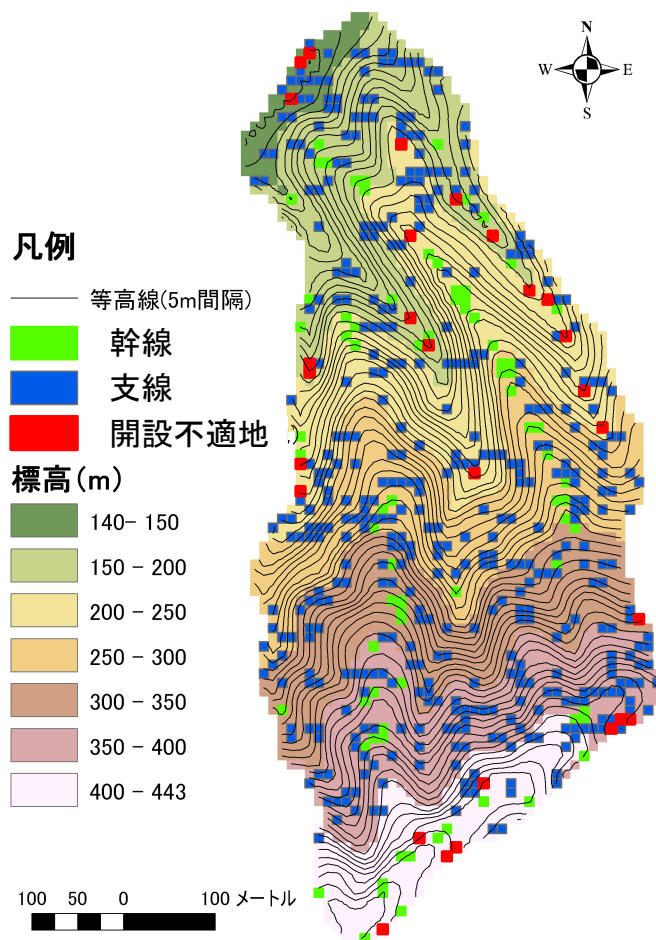


図-7.10 轟山における各候補地の位置図

8章 総括

本研究の目的は、経験の浅い技術者でも森林作業道を容易に設計できることを目指して、経験的知識が必要とされる作業効率の高い配置形状と崩壊しない最適な開設地の選定条件を明確にすることである。そのために、平均搬出距離の算出理論式を導出し、そこから作業効率の高い配置形状の明確化を行い、ラフ集合理論とコラムスコア法を用いて、崩壊しない堅固な開設地の選定条件の明確化を行った。以下に研究を総括する。

第二章では、搬出距離の確率分布関数とグラフ理論を導入して、循環や分岐のある路網の平均搬出距離の算出理論式を導出した。その結果、各頂点の搬出距離とその頂点の次数および次数を構成する入次数から平均搬出距離は算出できることが明らかになった。導出した式によって、現実のどの路網に対しても、路網全体の平均搬出距離の算出が可能となった。また、平均搬出距離が短い配置形状を明らかにするために、はしご型路網モデルを構築し、そのモデルの利用可能性を評価した。その結果、はしご型路網モデルは、現実の路網の平均搬出距離の推定に利用可能であり、平均搬出距離が短くなる配置形状を明らかにするのに有効であることが分かった。

第三章では、はしご型路網モデルにおいて平均搬出距離が短くなる配置形状を明らかにするために、第二章で提示したモデルの特性を分析した。その結果、支線間隔や幹線本数が平均搬出距離に与える影響は小さく、幹線の位置が平均搬出距離に最も強い影響を与えていることが分かった。ここから、平均搬出距離が最も短くなるのは幹線が支線の中点を通る配置であり、最も長くなるのは幹線が支線の端点を通る配置であることを示した。

第四章では、配置形状と木材搬出経費との関係について、平均搬出距離最長の配置形状と最短の配置形状とを用いて、木材搬出経費を試算した。その結果、100ha 当たりの木材搬出経費は、配置形状の間で年間約 140 万円の差があることが分かった。

第五章では、森林作業道開設地の選定条件の明確化に対して、ラフ集合理論が適用できるかを明らかにするために、判別割合を算出し、算出したその割合からラフ集合理論の適用可能性を評価した。その結果、判別割合は高く、経験的知識による森林作業道開設地の選定に対して、ラフ集合理論が有効であることを示した。

第六章では、コラムスコア法とクラスター分析を用いて、第五章で得られた地形条件の特徴を分析した。その結果、森林作業道の開設適地の地形的特徴には、当該地域の地質や尾根の比率から 2 パターンあることを明らかにするとともに、森林作業道の不適地には、地域に関わらない共通の地形的特徴があることを明らかにした。これらの結果によって、感覚的であった森林作業道の適地、不適地の選定が容易

に行えるようになった。

第七章では、選定条件の抽出に用いた 12 森林作業道を対象に、第六章で得られた条件を再度適用し、各条件に該当する地点に森林作業道が開設されているかを表す選択性を評価するとともに、選定条件に用いていない 2 森林作業道を対象に条件を適用し、各条件の汎用性を評価した。その結果、多くの森林作業道において、開設適地に該当する地点に森林作業道は開設されている一方、すべての森林作業道において、不適地に該当する地点には全く開設されていないことが分かった。また、汎用性の分析に用いた 2 森林作業道でも同様の選択性の結果が示されたことから、開設適地と不適地の条件の汎用性が高いことが分かった。

以上から、これらの結果を用いて、幹線魚骨型路網の開設適地と不適地を GIS 等によって、図示し、可視化の経験が必要であった作業効率の高い配置形状の設定が簡単に行えるようになり、これは森林作業道のすることは、経験の浅い技術者が開設適地と不適地を判断するに当たっての支援となる。すなわち、長年配置計画の労力や時間、経費の削減、さらに安全性の向上に有効であると考えられる。

謝辞

本論文の作成にあたり、研究の基礎から終始丁寧で細かな指導を行ってくださった東京農工大学農学部岩岡正博准教授、東京農工大学農学部土屋俊幸教授に心から厚く御礼を申し上げます。また、ご校閲の労をとってくださり、ご指導ご助言頂きました宇都宮大学田坂聡明教授、有賀一広准教授、東京農工大学五味高志准教授に心から感謝の意を表します。そして、研究室での研究、生活面すべてにおいて様々なご支援してくださいました、東京農工大学森林利用システム学研究室学生諸氏に感謝いたします。

引用文献

- 防災科学技術研究所．地すべり地形分布図データベース．オンライン
<http://lswb1.ess.bosai.go.jp/index.html>．2009年12月14日参照．
- 榎本雄介・原田利宣・水谷政夫（2007）腕時計の専攻分析におけるラフ集合と数量化理論第Ⅱ類の比較研究．デザイン学研究 53（5）：29～34．
- ETGeo Wizards．Spatial Technique．オンライン <http://www.ian-ko.com/>．2009年12月9日参照．
- 広兼道幸・古田均・中井真司・三雲是宏（1997）斜面の崩壊危険度診断事例からのラフ集合を用いたルール型知識の抽出方法．土木学会論文集 582：285～294．
- 堀高夫・北側勝弘・長谷川好正（1971）林内到達距離の分布に関する研究．日本林学会誌 53（11）：355～358．
- 堀高夫・李永浩（1989）林道網計画対象地の傾斜分布による地形評価（Ⅰ）．日林誌 71（8）：303～308．
- 茨木俊秀・永持仁・石井利昌（2010）グラフ理論：連結構造とその応用．324pp，朝倉書店，東京．
- 井上勝雄・広川美津雄（2000）認知部位と評価用語の関係．感性工学研究論文集 1（2）：13～20．
- 井上章二・高橋佑介（2003）のり面保護を目的とした木製構造物の控え材に関する実験的研究．森林利用学会誌 18（4）：271～274．
- 井上源基（1989）トラクタ集材の配置に関する研究 第2報 トラクタ集材のための集材路網計画法．林試研報 353：1～126．
- 石川知明・辻端武彦・松下明弘・板谷明美・辻本清美・辻端隆彦（2008）高性能林業機械による大径材搬出作業システムの作業分析と改善．森利学誌 23（2）：53～62．
- 伊里正夫・島川陽一・長井哲史（1990）標高データから得られる不変量について－尾根と沢の抽出アルゴリズム．地理情報システム学会講演論文集 8：121～125．
- イワフジ工業株式会社．フォワード | イワフジ工業株式会社．オンライン．
<http://www.iwafuji.co.jp/lineup/forest/u.htm>．2011年6月30日．
- イワフジ工業株式会社．木寄せウィンチ | イワフジ工業株式会社．オンライン．
<http://www.iwafuji.co.jp/lineup/forest/tw.htm>．2011年6月30日．
- 岩川治・柘植寛（1986）作業道の林業的評価に関する研究（Ⅰ）－天竜地域作業道の林道との関連からの考察－．静岡大学農学部演習林報告 10：57～62．
- 岩川治・柘植寛（1987）作業道の林業的評価に関する研究（Ⅱ）－山岳地域作業道の利活用の特徴と維持管理に関する考察－．静岡大学農学部演習林報告 11：51～58．

- 岩川治（1993）民有林作業道～今日的課題とその選択. 115pp, 静岡県山林協会, 静岡.
- 上飯坂實（1971）森林利用学序説. 234pp, 地球社, 東京.
- 上飯坂實・神埼康一（1990）森林作業システム学. 300pp, 文永堂出版株式会社, 東京.
- 関西研究チーム（1995）タワーヤーダを中心とした搬出作業. 機械化林業 501 : 23～30
- 関西研究チーム（1996）タワーヤーダを中心とした搬出作業. 機械化林業 513 : 16～23.
- 神埼康一・三宅徹（1990）急傾斜地作業路網の評価指標について. 京都大学農学部演習林報告 62 : 208～214.
- 加藤誠平・夏目正（1956）森林土木. 219pp, 朝倉書店, 東京.
- 小林洋司・福田光正（1975）林道および作業道の路面の支持力に影響を及ぼす因子について. 日本林学会誌 57 (5) : 135～143.
- 小林洋司・福田光正（1978）軟弱地帯における二、三の林道（作業道）路盤作設工法について. 日本林学会誌 60 (5) : 173～178.
- 小林 洋司・仁多見俊夫・有賀一広・桜井倫・杉浦直重（2005）作業道の路体構造に関する一考察. 森林利用学会誌 19 (4) : 283～286.
- 木幡靖夫（2002）フェラーバンチャによる間伐作業. 機械化林業 584 : 20～26.
- 国土交通省. 国総研資料第 364 号. オンライン
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0364.htm>. 2009年12月9日参照.
- 町田貞（1982）地形学辞典. 767pp, ニノ宮書店, 東京.
- 松尾宗雄（1994）タワーヤーダ, プロセッサの普及定着に向けてー高性能機械モデル団地設定システム化調査事業ー. 機械化林業 489 : 36～44.
- 水越博子・阿仁屋政武（2000）数値等高線データを用いた斜面形の自動分類. 地形 21 (3) : 307～328.
- 森典彦・田中英夫・井上勝雄編（2004）ラフ集合と感性. 187pp, 海文堂出版株式会社, 東京.
- 中沢圭二・市川浩一郎・市原実（1987）日本の地質 6 近畿地方. 297pp, 共立出版株式会社, 東京
- 中澤昌彦・吉田智佳史・陣川雅樹・山田容三・土屋麻子・岩岡正博（2006）用材搬出コストの試算と間伐作業システムの最適化. 森利学誌 21 (2) : 133～140.
- 日本林業技術協会（1999）森林・林業百科事典. 1236pp, 丸善株式会社, 東京.
- 岡本正男・荒木義則・中山弘隆・古川浩平・水山高久（2002）ラフ集合を用いたデータマイニングによる土砂移動現象の重要要因及びルール抽出に関する研究. 砂防学会誌 54 (6) : 4～15.
- 岡勝・中澤昌彦・田中良明・吉田智佳史・近藤耕次・仮利屋義広（2007）フォワードの走行に及ぼす路

- 網規格と積載量の影響. 森利学誌 22 (3) : 163~170.
- 奥原浩之・松原行宏・杉原一臣・石井博昭 (2004) 感性評価のための属性の序数性を考慮したラフ集合によるルール抽出.
- 大橋慶三郎・神埼康一 (1989) 急傾斜地の路網マニュアル. 173pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 大橋慶三郎 (2001) 大橋慶三郎の道づくりのすべて. 159pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 大橋慶三郎・岡橋清元 (2007) 写真図解作業道づくり. 106pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- Pawlek,Z (1982) Rough Sets. International Journal of Computer and Information Science.11:341~356.
- 林業機械化推進研究会 (1995) 機械化のデザイン. 195pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 林野庁 (1999) 作業路作設の手引き. 林野庁業務資料.
- 林野庁 (2010a) 路網・作業システム検討委員会最終とりまとめ. オンライン, (<http://www.rinya.maff.go.jp/j/seibi/saisei/pdf/romousaisiyuu.pdf>). 2012年6月12日.
- 林野庁 (2010b) 路網・作業システム検討委員会資料. 林野庁業務資料.
- 林野庁 (2011) 森林・林業基本計画. オンライン,
- 酒井秀夫・上飯坂実 (1979) 伐区の形の集材機作業に及ぼす影響. 日林論 90 : 543~544.
- 酒井秀夫・伊藤幸也・石原猛 (1988) チェーンソーによる間伐木の伐木造材作業. 日林誌 70 (1) : 1~10.
- 酒井秀夫・岩岡正博・朴相俊・小林洋司 (1996) ハーベスタ・フォワーダによる間伐作業の作業能率. 東大農学部演習林報告 94 : 29~47.
- 酒井秀夫 (2004) 作業道—理論と環境保全機能—. 284pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- 酒井徹朗 (1986) 作業道の実態について. 日本林学会大会発表論文集 97 : 647~650.
- 酒井徹朗 (1987) 作業道の実態について (II). 京都大学農学部演習林報告 58 : 165~174.
- 榊原弘行・倉本和正・菊池英明・中山弘隆・鉄賀博己・古川浩平 (2000) ラフ集合を用いたデータマイニングによるがけ崩れ発生要因の抽出に関する研究. 土木学会論文集 658 : 221~229.
- 桜井洋祐・力丸厚・高橋一義 (2006) 地形ブレイクライン情報を抽出・活用した SRTM-DEM 再分割手法の検討. 写真測量とリモートセンシング 45 (5) 46~52.
- 澤口勇雄 (1996) 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究 (第一報) —林道路線評価パラメータの特性—. 森林総研研報 372 : 1~110.
- 澤口勇雄・高橋佳史・立川史郎・高橋健保 (2011) 新設作業路の支持力の経年変化. 森林利用学会誌

26 (2) : 97~104.

佐藤朝子 (1995) 標高値による林道災害予測の可能性の検討. 東京農工大学修士論文, 177pp.

佐藤丈晴・河野泰典・荒木義則・中山弘隆・水山高久・古川浩平 (2002) 1982年7月長崎災害におけるラフ集合を用いた土石流発生・非発生の評価ルール設定に関する研究. 土木学会論文集 721 : 13~21.

森林保全管理技術研究会 (2011) 路網整備と森林施業 (特に間伐) 技術体系に関する調査研究. 平成22年度報告書 : 1~154.

鈴木秀典・梅田修史・山口智 (2007) 高密路網が開設される特徴. 関東森林研究 58 : 213~215.

鈴木隆介 (1997) 建設技術者のための地形図読図入門第1巻. 200pp, 古今書院, 東京.

鈴木隆介 (2000) 建設技術者のための地形図読図入門第3巻. 765~768p, 古今書院, 東京.

武井裕太郎・伊藤要・村上文美・斎藤仁志・有賀一広・田坂聡明 (2010) 木製土木構造物の経年変化による強度低下予測に関する研究 : 栃木県の木製土木構造物を事例として. 森林利用学会誌 25 (4) : 215~219.

谷山徹 (2001) 小型プロセッサ CT-500 (GP-532) を使用した間伐作業の事例. 機械化林業 566 : 18~24.

立切哲也 (1994) 佐賀県一高性能林業機械作業システム確立のための基礎調査. 機械化林業 486 : 9~13.

竹本大昭・杉原成満・佐藤丈晴・荒木義則・中山隆弘・水山高久・古川浩平 (2004) ラフ集合を用いた土石流発生・非発生 Rule の抽出と危険度の設定手法に関する研究. 砂防学会誌 57 (2) : 4~15.

田辺浩史・椎塚久雄 (2007) ラフ集集合を用いたかっこいいスーツの特徴抽出. 工学院大学研究報告 101 : 123~129.

田邊由喜男・大内正伸 (2007) 図解これならできる山を育てる道づくり. 157pp, 農山漁村文化協会, 東京.

田中博・津本周作 (1994) ラフ集合ーその理論と応用 ラフ集合とエキスパートシステム. 数理科学 378 : 76~83.

寺島智巳・坂本知己・白井智樹 (2001) 北海道の0次谷における地下水流出に伴う粗粒土砂流出の実態と流出プロセスの検討. 地形 22 (1) : 1~22.

塚本良則 (1973) 侵食谷の発達様式に関する研究 (I) 豪雨型山崩れと谷の成長との関係についての一つの考え方. 新砂防 25 (4) : 4~13.

- 塚本良則 (1973a) 侵食谷の発達様式に関する研究 (II) 谷の分岐に関する一考察. 新砂防 26 (1) : 1
~6.
- 塚本良則 (1973b) 侵食谷の発達様式に関する研究 (III) 0 次谷と山崩れの関係. 新砂防 26 (2) : 14
~20.
- 塚本良則 (1974) 侵食谷の発達様式に関する研究 (IV) 0 次谷の数を推定する方法. 新砂防 27 (2) :
20~27.
- 津本周作・田中博・(1994) ラフ集合—その理論と応用 ラフ集合と学習. 数理科学 377 : 78~83.
- 梅田修史・鈴木秀典・山口智 (2007) 作業道路網の開設に関する一考察. 森林学誌 22 (3) : 143~152.
- U. スンドベリー・C. R. シルヴァーサイズ (1996) 森林生産のオペレーショナル・エフィシエンシ
ー. 477pp, 海青社, 滋賀.
- 臼井時男 (1995) 高性能林業機械の使用を現地に見る—福岡県嘉穂町森林組合の場合—. 機械化林業
497 : 49~62.
- 渡辺誠次郎 (1993) 山岳地における崖錐の発見法の開発. 東京農工大学卒業論文, 88pp.
- 矢部和弘・旗生規・豊川勝生 (2010) 作業道における片勾配の排水および浸食防止効果. 東京農業大学
農学集報 55 (3) : 249~255.
- 山崎一・林英夫 (2003) 木製構造物による法面補強効果とそのメカニズムに関する模型実験. 森林利用
学会誌 18 (2) : 85~94.
- 與儀兼三・山場淳史・川元満夫・佐野俊和 (2010) 広島県北部地域の作業道の斜面傾斜と路面縦断勾配
および路面支持力の関係. 森林利用学会誌 25 (2) : 97~102.
- 吉村哲彦・神崎康一 (1993) 階層分析法 AHP による急傾斜地路網案の選択法について. 京都大演報 65 :
266~276.
- 全国林業改良普及協会編 (2001) 機械化のマネジメント. 239pp, 全国林業改良普及協会, 東京.