

## トラクタ集材路網の配置に関する研究 第1報

## トラクタ集材のための地形区分

井 上 源 基<sup>(1)</sup>

Motoki INOUE : Studies on the Tractor Skidding Road Network Planning I  
Terrain classification of the forest land in tractor logging site

要 旨 : トラクタ集材作業計画に係わる問題として、各種の集材現場に対して技術的かつ経済的に適切な集材方法や集材路網計画を確立しようとする場合、まずトラクタ集材現場の地形条件を定量的に把握する必要があり、様々な集材現場に対して統一性のある機能的分類表示が要望される。本報では、トラクタ集材路網の導入に対して影響を与える地形・地表因子について、代表的なトラクタ集材地を対象としてその記述表示法について検討した。また想定林地を設定し、トラクタの走行難易度について明らかにし、トラクタ地形分類の評価法を提示した。主要な成果は次のとおりである。

1) トラクタの林地への導入に際し障害となる因子は、(1) 地形傾斜因子 (平均傾斜、傾斜度の分布、傾斜方向の分布状態)、(2) 地表障害物因子 (密度、平均径、分布状態)、(3) 地表状態因子 (土質、含水率) となり、これらの因子の分類により、林地条件を特徴づけることができた。

2) トラクタの林内走行の到達難易度について、1) の各因子の異なる想定林地に対しシミュレーション試験を行った結果、その走行難易度は、1) の各因子を含む関係式で表すことができた。

3) トラクタ集材地形に対する評価法として、地表障害物に関する指数 ( $I_p$ ) と地形傾斜及び地表状態に関する指数 ( $I_t$ ) からなるトラクタ地形指数を算定し、この地形指数によりトラクタ地形を簡易に分類する方法を提示することができた。

## 目 次

第 I 章 緒 論	48
第 1 節 本研究の目的と構成	48
第 2 節 研究範囲と既往文献	49
第 II 章 トラクタ集材路網計画のための地形因子の把握と評価	50
第 1 節 緒 言	50
第 2 節 地形傾斜の記述表示と評価	51
2.1 対象域に対する地形傾斜の把握	51
2.1.1 対象域の地形の型と傾斜方向の一致度	52
2.1.2 対象域の地形の急峻度と複雑度	53
2.2 現場における地形傾斜と傾斜区分	55
第 3 節 地表障害物の記述表示と評価	57
3.1 地表障害物の種類と出現頻度	58
3.2 地表障害物の分布状態	63
第 4 節 地表状態の記述表示と評価	73
第 III 章 トラクタ集材地形の地形分類	76
第 1 節 緒 言	76
第 2 節 トラクタ地形分類のためのシミュレーション手法概要	76

2.1	トラクタ走行の難易度	77
2.2	林地条件の設定	78
2.3	電算解法の手順	83
第3節	トラクタ走行難易度と林地条件	85
第4節	トラクタ地形区分法	88
4.1	トラクタ集材地形の分類	88
4.2	現地への適用とトラクタ地形指数	94
第IV章	要約	99
引用文献		100

## 第 I 章 緒 論

### 第1節 本研究の目的と構成

トラクタ集材は、一般に架線集材に比べ現場の地形および地表条件に制約を受けやすく、森林環境へ与える影響も少くない。しかし一方、架線作業のように集材費に固定費が増分となって現れる副次的作業が少ないこと、また比較的簡易な集材技術により施業上の条件に沿った集材を適宜に実行できること、さらに少ない労働力により生産効率を高めることができる等大きな利点を有している。したがって米国、カナダ等の諸外国では勿論、比較的山岳林が多い諸国でも集約的施業が要求される地域では、条件の許す限りトラクタ集材が好んで適用される傾向がある。トラクタ集材の適否を決定する因子である地形傾斜を20度とすれば、わが国では森林面積の42%がトラクタ集材適地となり、近年のトラクタの機械性能の向上や集材技術の向上を考えれば、さらにトラクタ集材の可能面積は増大するものと思われる。したがってトラクタ集材の役割は益々増大することが予想される。

トラクタ集材に関する研究は、大別して集材用トラクタに関する機械性能の分析を主とする機械工学的研究と集材作業計画や管理の把握を主体におく経営工学的研究に分けられる。しかし、これらの研究の多くは、それぞれ独立に扱われるものは少なく、相互に関連を持たせた研究となっている。1981年わが国で開催された IUFRO 会議のトラクタ集材に関する研究をみてもその傾向がうかがえる<sup>1)</sup>。

そもそもトラクタ集材の課題は、山元の素材を予定期間内に最も安く、安全かつ確実に搬出することにある。したがって研究の中心は、安全かつ高性能なトラクタの開発や改良を前提として、これらの機械を伐出作業に融合させた合理的集材作業を実現させるための諸問題の研究となる。

本研究は、トラクタ集材技術にかかわる問題として、各種トラクタ集材現場に対して、技術的かつ経済的にも妥当なトラクタ集材方法を見出すためのものである。特に本報告ではトラクタ集材路網の配置計画を確立するための前提となるトラクタ集材現場の林地条件について定量的な評価法が必要であり、各種集材現場に対して、統一性のある機能的な分類表示法の提供を目的としている。

II章以降の内容は、トラクタ集材現場の地形・地表の記述表示として、スウェーデン地形分類<sup>2)</sup>に基づく地形傾斜、地表の粗さおよび地表状態を取り上げ、トラクタ集材作業に影響を与える地形・地表の記述表示法について論述した。またわが国の代表的トラクタ地形について比較検討を行った。さらに想定林地を設定し、トラクタ走行難易度からトラクタ集材地形の地形区分を提示するとともに、各地形を概括的に

把握表示する方法として地形傾斜、地表障害物および地表状態からなるトラクタ地形指数を提案した。

本研究の結果は、トラクタ集材作業の予測の判断基準を与えるものとして利用が可能となり、トラクタ集材路網計画の立案の際の林地条件の把握として、全体的な地形条件を客観的に評価することが可能となる。

## 第2節 研究範囲と既往文献

伐出作業の場としての地形・地表事象の計量と評価に関する新しい展開は、1964年モンリオールで開催された「森林作業と機械のための地形分類」をテーマとした IUFRO 会議<sup>3)</sup>や1969年の「間伐の機械化に関するシンポジウム」の IUFRO の会議<sup>4)</sup>である。

「森林作業と機械のための地形分類」のシンポジウムでは、伐出作業の場としての地形区分に関し、各方式の提言が諸外国から紹介された。例えば、STEINLIN, H<sup>5)</sup> は作業種と使用する機械を地形に応じて適用するという考えから地形分類を行う方式(西ドイツ方式)や STRØMNES, R<sup>6)</sup> や SAMSET, I ら<sup>7)8)</sup> の架線集材に対しても適用されるノルウェー方式。GOMBRICH, L<sup>9)</sup> の特に車輛類による集材のための地形分類であるスウェーデン方式等の多くの分類方式が提示された。表1は諸外国およびわが国における地形の記述要素とその適用目的を示したものである。

1972年 FAO により報告された「森林開発の難易評価」<sup>9)</sup>では、森林開発の順位付けの方法および開発区域の伐出に関する適切な技術システムの方法が示された。この中で伐出難易に関係する林地条件について、特に地形や地表条件について環境評価指数を定義し、定量的に地況を分類する方法が示されている。また ADAMOVICH, L<sup>10)</sup> は、森林の集約的利用のための路網計画の立案の際の基礎的情報量として、地形分類システムの必要性を論じている。これらの報告は、森林地形区分の研究をさらに進めたものであり、各森林に共通の統一性のある地形分類方式の必要性を論じたものといえる。

わが国における森林地形区分の研究は、林道密度理論の研究の一環として推し進められた。表2に示すように林道開設の難易や伐出作業の仕組に対する森林地形分類の方法が示された<sup>11)~14)</sup>。堀<sup>14)</sup>は表1に示す三つの地形要素から地形指数を定義し、森林地形を概括的に表示分類する方法を提示した。また地形分類体系を作業条件に適合させるために、上の三地形要素のほかに地盤条件や到達難易性を加えて分類する方法の報告<sup>15)</sup>がある。しかし、これらの地形分類は、面積500~1000haの森林地域を対象とした総括的な把握方法であり、微細な地形や地表障害等については考慮されていない。

トラクタ集材に関する現場条件の把握として、林内にトラクタを導入した際のトラクタ走行や集材けん引等に影響を与える微細な地形や地表障害に関する研究として、諸外国では、BEKKER, M.G. を初め多くの研究例がみられるが、どちらかという車輛類に主体をおいた純技術的ないし機械工学的観点からの研究が多い<sup>16)~21)</sup>。

わが国における、この種の微細地形に関する研究として、堀<sup>22)</sup>は、林内の地表障害物の出現頻度について確率論的立場から究明した報告、天然林地における地形、地表障害物とトラクタ走行の迂回率の

表1. 諸外国の地形区分

国名	地形の記述	適用
西ドイツ (Steinlin)	地耐力、地表障害物、傾斜	作業種と使用機械
ノルウェー (Samset)	傾斜、スロープの長さ、地表の規則性	集材方式
スウェーデン (Gombrich)	地表状態、地表の粗さ、傾斜	機械導入の可否
日本 (加藤)	傾斜、谷密度、起伏量	林道建設難易度

表2. わが国の森林利用学的地形分類

集材作業の標準タイプ	地形	使用機械	必要施設	林道建設難易	地形指数
Type 1 (トラック地形)	(平坦)	トラック, ログローダ または荷積クレーン	施業林道, トラック輸 送のための作業道	(30~50 m/ha)	0~19
Type 2 (トラクタ地形)	(緩斜)	トラック, トラクタ, 荷積機	施業林道, トラック作 業道, トラクタ作業道, 土場	(20~30 m/ha)	20~39
Type 3 (架線・中距離)	(急)	トラック, 架線集材機, 荷積機	施業林道, トラック作 業道, 架線索張方式, 土場	(10~20 m/ha)	40~69
Type 4 (架線, 長距離)	(急峻)	トラック, 荷積機, 架 線集材機(索道機械)	施業林道, トラック作 業道, 架線索張方式, 土場	(5~15 m/ha)	70~

関係についての報告等がある<sup>23)</sup>。また、車輛類の立場からみた地形、地表障害物の研究として村山ら<sup>24)25)</sup>の林内走行車の到達難易に関する報告、山脇<sup>26)</sup>や猪内<sup>27)</sup>らに代表される林業トラクタの傾斜地および不整地における走行性に関する幾つかの報告がある。最近、上飯坂ら<sup>28)</sup>により林内の地表障害に関する総合的な研究が報告され、トラクタ等の林内走行車輛類の作業に影響を与える微細な地形に関する問題を研究しているが、まだ数多くの問題が残されている。

## 第II章 トラクタ集材路網計画のための地形因子の把握と評価

### 第1節 緒 言

地域森林計画における森林簿には、森林の機能、林種、伐採方法等30項目に近い森林タイプ区分に関するデータが林小班ごとに記録されている。森林に対する巨視的な分類はこれを用いることで十分であり、林道網計画や集運材作業の全体計画の立案には適用が可能である。しかしここでいう森林条件としての「森林利用学的地形把握」<sup>13)</sup>は、微視的な集材作業の場としての地形把握が主眼となっている。

森林利用学的立場からみた地形把握は、一般には、集運材作業の場に対して架線集材方式かトラクタ集材方式かといった大まかな集材方式の決定や林道網計画のための大規模の面積を対象としたマクロな総括的地形の把握が主体となっているが、トラクタ集材作業を前提とした場合の地形把握では、地表上の因子、例えば地表の凹凸や転石、伐根、枝条といった地表障害物、あるいは下層植生、地表の含水状態といった因子を考慮した微細地形についても考える必要がある。

トラクタ集材作業の成否、あるいはその難易度に関係する地形記述因子には、地形傾斜度や地表障害物の密度や大きさといった量的な因子と地表の土質や障害物の種類や分布状態の違いといった質的因子が含まれるが、地表上における作業を主体とするこの集材方式に対しては、これらの地形因子の記述は、地表面に対し高さの次元、横への広がり次元および地表面下の次元としてみることもできる。

ここでは、諸外国で取り上げた各地形記述から、この考えに近くトラクタ集材作業およびトラクタ集材路網計画を考える中で最も適応性が高いと思われるスウェーデン式地形分類<sup>2)</sup>の地形記述を基に、各地形

表 3. 調査地概要

調査地	東京大学農学部 北海道演習林		長野営林局 伊那営林署	前橋営林局		長野営林局 岩村田営林署
	44 林班	46 林班	237 林班	155 林班	144 林班	67 林班
伐採方式	択伐	択伐	漸伐	皆伐	間伐	皆伐跡地
林相	天然林	天然林	天然林	人工林	人工林	人工林
立木密度	0.07	0.06	0.03	0.13	0.22	—
立木分布状態	ランダム	ランダム	ランダム	均一	均一～ランダム	—
伐倒本数	162	83	399	797	97	110
調査面積	5.12 ha	3.34 ha	2.20 ha	6.61 ha	0.68 ha	60m×60m
伐区形状 <sup>1)</sup>	0.5642	0.5233	0.4788	0.4009	0.5919	0.7854
平均地形傾斜(%)	13.5	29.6	34.9	26.7	9.6	8.5
起伏量(m)	60	100	50	50	13	7
トラクタ道延長(m)	1945 (293)*	1192	961 (177.1)*	865 (415)*	538	—
土場数	3	1	2	3	1	—

\* 林道・作業道の延長距離

<sup>1)</sup> 伐区形状:  $4\pi S/L^2$  (S: 伐区面積 (㎡), L: 伐区周長 (m))

因子の表示法について検討した。表 3 は、わが国のトラクタ集材を代表する集材地として取り上げた本研究の調査地の概要である。

## 第 2 節 地形傾斜の記述表示と評価

トラクタ集材作業の適否あるいはトラクタ集材路の導入の可否は、ほとんどの場合地形傾斜によって決定されることが少なくない。

集材現場にとって、トラクタ集材を可能にするためには、まず、現場の地形傾斜がトラクタ走行に際して登坂可能な勾配内にあり、また前後・左右方向の転倒に対し安全性を満す傾斜範囲にあることが必要となる。しかし集材を可能にするには、これらの条件が集材地全体を満す必要はなく、集材現場内にこれらの条件を満す箇所がある程度連続してあれば、トラクタあるいはトラクタ道は、この箇所を選定して林内に導入することができる。

集材地の地形傾斜の記述は、一般に対象とする林地の平均傾斜をもって代表されるが、上述の如く、トラクタの集材走行あるいはトラクタ集材路の導入といった連続的なものに対する地形評価では、同一の平均傾斜でも、その傾斜度の分散の違いや傾斜方向の分布状態の違いによって、その評価は異なってくる。

本節では、トラクタ集材作業に対する地形傾斜の記述要素として、地形の型（傾斜方向の分布状態）、平均傾斜およびその分散を取り上げその評価法について検討し、トラクタ集材作業のための傾斜区分について検討した。

### 2.1 対象域に対する地形傾斜の把握

一般に、対象域全体の地形把握は、対象域の地形の型をアナログ的にとらえる場合<sup>29)~32)</sup>と対象域を任意の区画に分割し、各分割地のデジタル量を平均化してとらえる場合<sup>33)~38)</sup>がある。

前者は、地形の断面の集まりあるいは曲面として表現しようとするものであり、対象域全体の地形を連続的にとらえることができる。また後者は分割された各点の地形要素、例えば地形の急峻度や複雑度を対

象域の頻度分布として表し、対象地の地形の特徴を平均的に見ようとするものである。

ここでは、対象地全体の地形把握として、対象地の“地形の型”の表現法とその分類について検討し、さらに地形を構成する要素について地形の急峻度と地形の複雑度および平均傾斜の関係について明らかにした。

2.1.1 対象域の地形の型と傾斜方向の一致度

集材現場において、集材路網配置の概略計画を立てる場合、その対象地の大まかな尾根や沢の位置が必要となる。

“地形の型”は、対象地内の各点の地形を連続的な広がりとしてとらえようとするものであり、対象地内の尾根や沢の位置・大きさや最急勾配方向の分布特性を立体的連続量で表現しようとするものである。

地形の連続的広がりを表す方法としては標高を曲線に内挿する方法<sup>29)~32)</sup>やフーリエ級数に近似する方法等<sup>32), 39)~41)</sup>があるが、対象地の巨視的な山の型をとらえる場合では式(2.1)に示すような3次式程度の曲面式が一般的である。

$$Z = a_0 + (a_1X + a_2Y) + (a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2) + (a_6X^3 + a_7X^2Y + a_8XY^2 + a_9Y^3) \dots\dots\dots(2.1)$$

すなわち、対象地の尾根や沢の位置は、式(2.1)から対象地の各点における最急勾配方向の分布を算出することにより求めることができる。各点の斜面方位(北方位から)の算定式は次式のとおりである。

$$\tan \varphi = \frac{dz}{dx} / \frac{dz}{dy} \dots\dots\dots(2.2)$$

図1(b)は、地形の型と傾斜方向を示したものであるが、任意の広がりをもつ面域を小区域に分割すれば、トラクタ地形の型は、ほぼこの4タイプに分類されると考えられる。図からわかるように、地形の

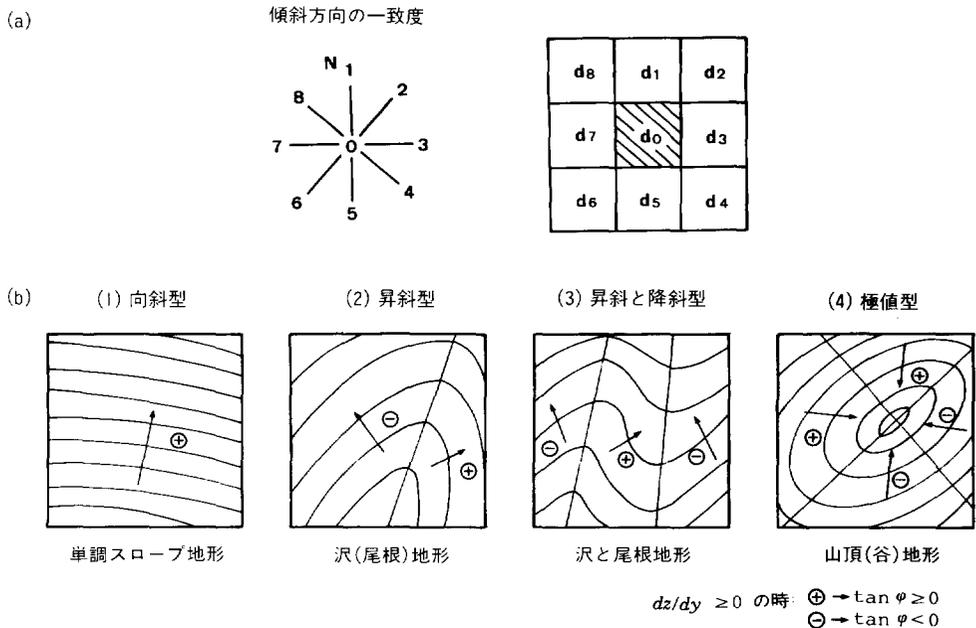


図1. 地形の型と傾斜方向

型は傾斜方向の分布状態によって示され、傾斜方向のバラツキの違いがその地形の複雑性や等高線の入り組みの程度を表している。そこで各地形モデルについて傾斜方向の一致度について次のような方法により算定した。

任意の区画に分割された各メッシュの傾斜方向は式 (2.2) で求まることから、図 1 (a) より当該メッシュの傾斜方向  $d_0$  と隣接メッシュの傾斜方向  $d_1 \sim d_8$  のそれぞれの違いを  $d_{0i}$  とすると、 $d_{0i}$  は  $45^\circ$  離れるに従って一つずつ増加するテーブル関数により求めることができる。ゆえに、単位メッシュの傾斜方向の一致度  $d_a$  は

$$d_a = \sum_{i=1}^8 d_{0i} / 8 \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

となる。また対象測定プロット面全体の傾斜方向の一致度を  $D_a$  とすると、 $D_a$  は単位メッシュを平均することによって求められる。

$$D_a = \sum_{i=1}^m d_{ai} / m \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

ただし、 $m$  はメッシュの数。したがって、対象地全体の傾斜方向の一致度は、各測定プロットの  $D_a$  を総平均することにより求められる。それぞれ地形の型ごとの傾斜方向の一致度  $D_a$  を示すと次のとおりである。

- ① 向斜型                                0~0.5
- ② 昇斜型                                0.5~1
- ③ 昇斜と降斜型                        1~1.5
- ④ 極値型                                0.75~1
- ⑤ ランダム型                            2

ただし、ランダム型は傾斜方向がランダムに分布する場合であり、乱線の交角の確率密度関数から求めることができる<sup>42)~46)</sup>。

以上のことから、傾斜方向の一致度が高い程、傾斜方向の分布状態はバラツキが大きく地形は複雑化することになり、単純な地形では、 $D_a$  は 0 となり、最も複雑なランダムな地形では  $D_a$  は 2 となることがわかった。

そこで、対象区域における等高線の入り組み程度を迂回率の概念を用いて定義すると、等高線の入り組み率  $\eta_c$  は傾斜方向の一致度  $D_a$  によって表される。例えば、入り組み度が最大となるランダム地形の場合、隣接メッシュ間の傾斜方向の交角の期待値は  $90^\circ$  となることから、単純地形すなわち様な直線コンターに比べ一本当たりの等高線長は  $(\sqrt{2}-1)$  だけ長くなる。また単純地形では等高線の入り組み率は 0 となり、そのほかの地形では傾斜方向の一致度  $D_a$  が大きくなるに従って、 $\eta_c$  は  $0 \sim (\sqrt{2}-1)$  の範囲で増大することになることから、 $\eta_c$  と  $D_a$  の関係は次式 (2.5) で与えられることになる。

$$\eta_c = \frac{\sqrt{2}-1}{2} D_a \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

傾斜方向の分布に関しては第 III 章の林地モデル作成の際にさらに検討する。

### 2.1.2 対象域の地形の急峻度と複雑度

対象地の地形を評価するとき、その評価値は地形の急峻度と地形の複雑度に帰着すると考えられる。こ

れは地形を3次元の曲面  $Z=f(X, Y)$  とした場合、地形の急峻度は  $Z$  方向（高さ）の要素と考えられ、地形の複雑度は、 $X, Y$  平面（広がり）の要素と考えられる。換言すれば、前者は起伏量に代表されるものであり、後者は傾斜方向の分布状態や谷密度が考えられる。これを地形図からみると地形の急峻度は、当該地内の等高線の数に相当し、地形の複雑度は等高線の入り組み度合、すなわち、等高線一本当たりの長さに関係することになる。

そこで、地形の急峻度を  $W_1$ 、地形の複雑度を  $W_2$  とし、任意区域の地形評価値  $W$  を次のように定義した。

$$W = W_1 \times W_2 \dots\dots\dots(2.6)$$

ただし、 $W_1$ : 単位面積当たりの高低差、 $W_2$ : 等高線一本の長さ。

いま、対象地域内の測定プロットを任意の区画された矩形、あるいは任意点を中心とする任意半径の円とした場合、その面積  $A$  内の等高線の入り方は 図1 (b) で示したとおり、一様な単純地形から複雑ランダムな地形まで多様に存在する。そこで任意の地形の型に対するプロット内の等高線一本の長さは一様な地形とみなした場合の等高線一本の長さの期待値にそれぞれの地形の型ごとの等高線の入り組み度合を乗じたものとして表すことができる。また、一様な地形の場合、等高線は、等高線密度（等高線間の平均距離） $d$  なる平行線とみなしうるから、プロットの周長  $L_s$  に等高線が交わる数  $N$ 、およびプロット区域を横切る等高線一本の長さの期待値  $E(l)$  は、それぞれ Buffon の定理や乱線の定義から次式 (2.7) で表される<sup>42)-52)</sup>。

$$N = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{L_s}{d} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$E(l) = \frac{\pi A}{L_s}$$

ゆえに、測定プロットの地形の急峻度  $W_1$  および複雑度  $W_2$  は式 (2.8) となる。

$$W_1 = \frac{nh}{A} = \frac{Nh}{2A} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$W_2 = \frac{\sum l}{n} = E(l) \times (1 + \eta_c) = \frac{\pi A}{L_s} (1 + \eta_c)$$

ただし、 $n$ : 等高線の数、 $\sum l$ : 等高線総延長、 $\eta_c$ : 入り組み率、 $h$ : 等高線間隔。

したがって測定プロットの地形評価値  $W$  は、式 (2.7) および式 (2.5) を代入すると次式 (2.9) で表される。

$$W = \frac{Nh}{2A} \times \frac{\pi A}{L_s} (1 + \eta_c) = \frac{h}{d} (1 + \eta_c)$$

$$= \tan \theta \left( 1 + \frac{\sqrt{2}-1}{2} D_a \right) \dots\dots\dots(2.9)$$

そこで、対象地全体の地形評価値  $\bar{W}$  は、各測定プロットの  $W$  の総平均をもって表すことができる。

図2は、トラクタ集材地の対象伐区全体について地形の急峻度と複雑度および地形評価値についてトラクタ集材路網密度に関連させて示したものである。ただし、ここでは地形の急峻度として対象地全体の起伏量  $H/A$  (m/ha)、地形の複雑度として等高線間隔 10 m とした場合の対象地全体の等高線延長距離  $\sum l$  を等高線数  $n$  で割った値  $\sum l/n$  (m) である。この両者の積は次式のとおり等高線延長法による対象地全体の地形傾斜の値となる。

$$\bar{W} = \frac{H}{A} \times \frac{\sum l}{n} = \frac{nh}{A} \times \frac{\sum l}{n} = \frac{h \sum l}{A} = \overline{\tan \theta} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\therefore \overline{\tan \theta} = \tan \bar{\theta} \left(1 + \frac{\sqrt{2}-1}{2} \bar{D}_a\right)$$

すなわち、対象地全体としての地形傾斜の値 ( $\overline{\tan \theta}$ ) は、測定プロットごとの平均傾斜 ( $\tan \bar{\theta}$ ) に対象地の地形の入り組み程度 ( $1 + \frac{\sqrt{2}-1}{2} \bar{D}_a$ ) を乗じたものとなる。したがって、表5で示すように等高線延長法により求めた地形傾斜は、対象地内の傾斜分布を表す方法により求めた平均傾斜に比べ大きい値を示すことになる。

図2から、トラクタ集材路網密度別に地形との関係を見ると、地形が急峻でしかも複雑な対象地、すなわち、地形評価値が大きい集材地ほど集材のためのトラクタ道が必要となり、平坦かつ単純な地形ほど集材路網密度が小さくても集材作業が実行可能であることを示している。

2.2 現場における地形傾斜と傾斜区分

トラクタ集材作業に対する地形傾斜の評価は、地形傾斜が集材効率に与える影響としてとらえることができ、その傾斜区分は集材効率に関係する諸々の問題、例えば地形傾斜の違いによる登坂力やけん引力、走行速度、消費燃費、転倒に対する安全性等に対して適合性をもったものではない。

現場の地形傾斜を判定し表示するには、傾斜ごとの面積の度数分布表示や傾斜ごとの距離の度数分布表示がある<sup>53)</sup>。面積に関する表示法は同傾斜を結ぶ等勾配線間に囲まれた面積を傾斜ごとに度数化し、その平均により傾斜表示するものである。また距離による傾斜の表示法は、ランダムウォーク法や指向法があ

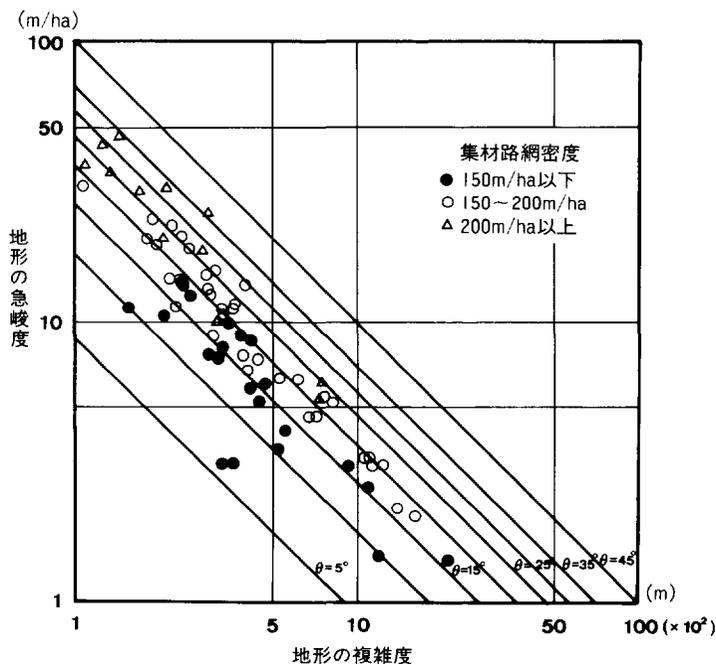


図 2. 地形の急峻度と複雑度

る。ランダムウォーク法は対象地をランダムに踏査測量し、傾斜ごとの距離延長を度数化する方法であり、指向法は踏査方向を一定方向に定め、同様に傾斜ごとの距離延長を度数化する方法である。これらの方法により得られた度数分布を確率密度関数に適用させることにより、地形傾斜の特性を表示することができる。

スウェーデン式地形分類による傾斜表示<sup>2)</sup>は面積による表示法に属するものであり、対象地に一定間隔の格子点を設け、各点から傾斜方向に水平距離 25 m をとり、その間の勾配を測定して傾斜ごとに度数化し、最多頻度をもってその対象地の傾斜評価値とする方法である。また傾斜区分は5クラスに分けられ、それぞれ、①0~10% (0~6°)、②10~20% (6~11°)、③20~33% (11~18°)、④33~50% (18~27°)、⑤50%以上 (27°以上)に区分されている。

表4は、天然林7試験地(東大北海道演習林)について、20 m 間隔の格子点に対してスウェーデン傾斜区分を適用したものである。また表5は、7試験地について現地測量により得た地形図を基に、各種の傾斜算定法<sup>54),55)</sup>より求めた平均傾斜とスウェーデン傾斜区分法による測定結果を比較したものである。各図上算定法は、等高線延長法、ホートン法(交点法)および最急傾斜法(方眼法)である。表4および5から、スウェーデン傾斜区分による各試験地の傾斜区分は、1クラス(試験地2, 3, 4)と2クラス

表 4. スウェーデン傾斜区分による天然林調査地(東大北海道演習林)

地形傾斜 クラス		1		2		3		4	5
		0-5%	5-10%	10-15%	15-20%	20-25%	25-33%	33-50%	50%-
調 査 地	1		4	9	13	3	1		
	2	6	24						
	3	1	16	3					
	4	5	14	11					
	5			10	13	7			
	6		3	20	7				
	7			15	9	2	4		
合 計	12	61	68	42	12	5			

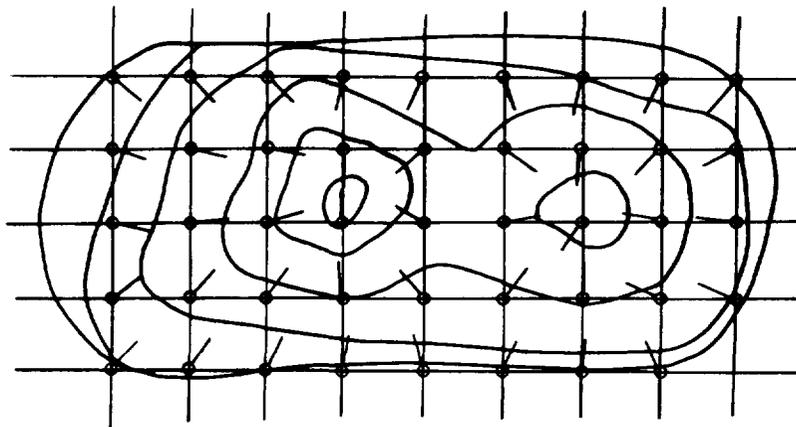


表 5. 各地形傾斜算定法による平均傾斜とスウェーデン傾斜区分

試験地 (100m×100m)	1	2	3	4	5	6	7
等高線延長 (m)	1732.382	693.669	866.296	893.590	877.350	677.872	828.782
平均傾斜 (%)	17.32	6.94	8.66	8.94	17.55	13.56	16.58
等高線と格子網の交点数	115	53	56	67	65	51	62
ホートン法による 平均傾斜 (%)	15.06	6.94	7.33	8.77	17.02	13.35	16.23
方眼法による平均傾斜 (%)	15.80	6.50	8.10	8.60	17.10	13.00	16.40
スウェーデン傾斜 区分による傾斜 (%)	15~20	5~10	5~10	5~10	15~20	10~15	10~15

(試験地 1, 5, 6, 7) に区分され、平坦～緩斜地クラスに属している。また、これらの傾斜区分は、各試験地とも図上から算定した平均傾斜に類似した関係を示した。しかし各試験地について、傾斜ごとの度数分布をみると、同一区分に属する試験地でもその分布はかなり違っている。

図 3 および図 4 は、これらの試験地にトラクタを走行させた場合のトラクタが遭遇した傾斜度の出現頻度および傾斜ごとの距離の分布を示したものである。図はスウェーデン傾斜区分により区分されたクラスごとおよびトラクタ機種別（ホイールトラクタ（重量 3.0 t）、クローラトラクタ（重量 5.5 t））に示したものである。傾斜クラス 1 の場合では、両トラクタともほぼ 4~5% の勾配を走行し、傾斜クラス 2 の場合では、ホイールトラクタで約 9.5%、クローラトラクタで約 10.5% の勾配を走行しており、トラクタは地形傾斜クラスの平均値の勾配を走行している。すなわち、これらのクラスの緩斜地ではトラクタはほぼ地形に沿った走行径路を辿っているが、傾斜クラスがさらに大きい場合は最急勾配を回避しながら走行することになる。しかしながら傾斜クラスが大きい場合、その傾斜度の分布の分散が大きい場合は、緩勾配への回避が可能であるが、分散が小さい場合は回避が困難となり、トラクタの導入は不可能となる。要するに、トラクタ集材に対して地形傾斜を表示する場合、平均傾斜と同時に、傾斜度の分散についても、取り上げる必要がある。

以上、地形傾斜の記述表示と評価について述べてきたが、トラクタ集材作業に対する地形傾斜記述因子として次の因子が必要となる。

- ① 平均傾斜
- ② 傾斜度の分布（分布型、分散）
- ③ 地形の型（傾斜方向の分布状態）

すなわち、これらの因子がわかれば、逆に種々の地形モデルを設定することが可能となる。

### 第 3 節 地表障害物の記述表示と評価

架線の場合と異なり、地表上における作業を主体とするトラクタ集材では、林内に散在する地表障害物の影響は少なくない。地表障害物はトラクタが林内を走行したり集材けん引する際、あるいは木寄せ作業の際に障害となる地表の突起物や窪地が対象となり、一般にその形状や質、密度および分布状態が問題となる。

トラクタが集材地を集材走行する際、これらの地表障害物の遭遇に対し、三つの走行パターンが考えら

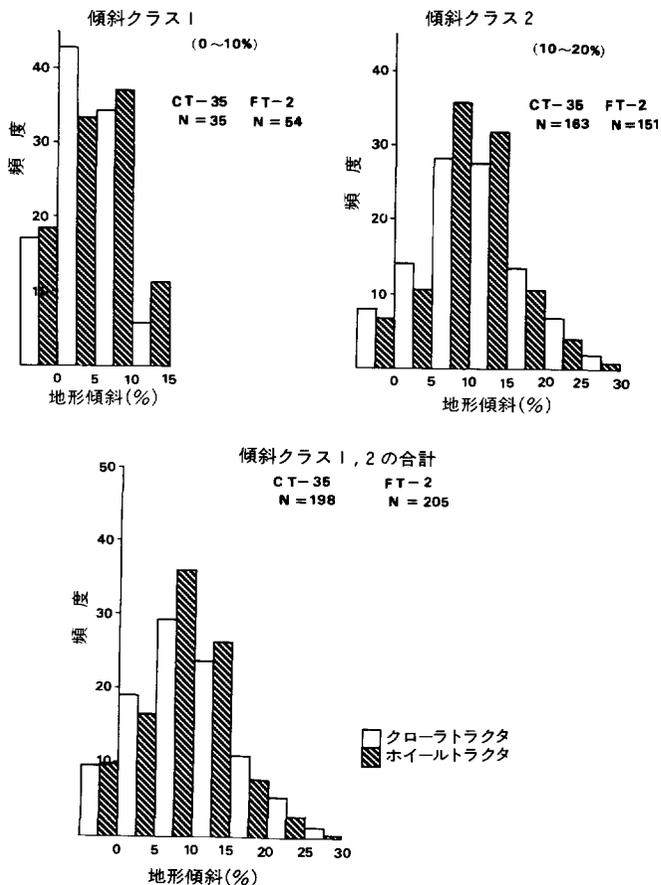


図 3. トラクタ走行による出現傾斜角 (天然林地)

れる。第1は地表障害物を回避して進路を変更する場合であり、第2は地表障害物を乗り越すか、あるいは障害物を撤去して直進する場合である。さらに第3はこの両者が不可能な場合であり、当然トラクタの走行は不可能となる。

BEKKER, M.G.<sup>18)</sup> はトラクタ走行に対する地表障害物の評価は、トラクタが通行可能か否かであり、障害物の形状や密度および分布状態によって決まるとしている。スウェーデン式地形分類の地表の粗さ分類では<sup>2)</sup>、地表障害物の記述として、障害物の高さ(体積)と出現頻度をあげている。また堀<sup>22)</sup> は、高さ、大きさおよび分布状態を取り上げている。いずれにしろこの地表障害物の集材地における存在パターンの違いが集材作業工期や集材コストに反映することになるし、トラクタの転倒等の安全性に対しても影響を与えることになる。

ここでは、トラクタ集材地の現地調査を基に地表障害物の種類、密度、大きさ(面積、体積)および分布状態について明らかにし、その表示法について検討した。

### 3.1 地表障害物の種類と出現頻度

集材地の地表物がトラクタ集材にとって障害物となるのは、トラクタが乗り越し不可能となる限界高によって決まる。この乗り越しの限界高は、一般にはトラクタの最大トルク、地表物と走行装置の粘着力あ

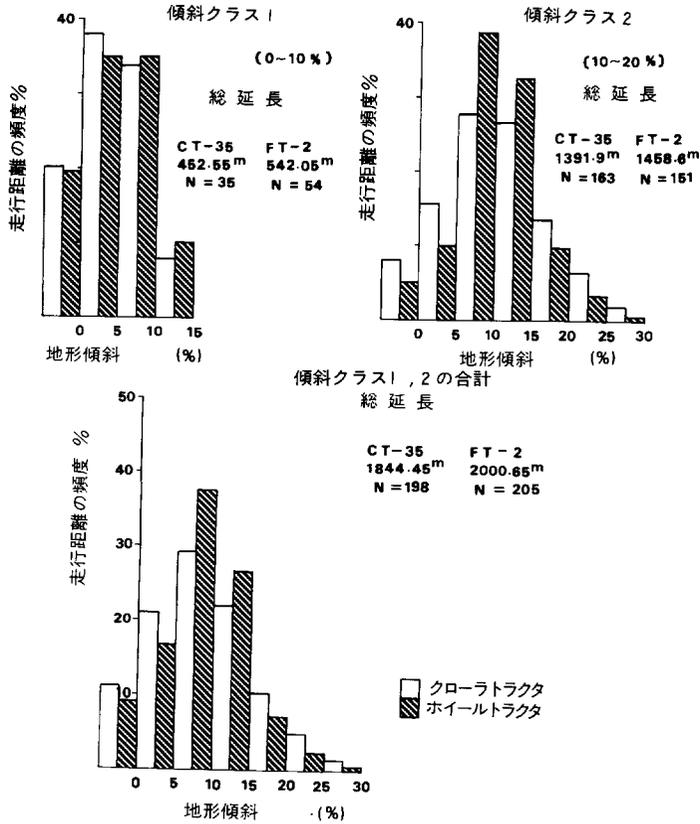


図 4. トラクタ走行による傾斜との出現距離 (天然林地)

るいは車体の地上高や転倒に対する安全性等の条件から決定される。猪内<sup>26)</sup>は、この限界高について 6t クラスの林業用トラクタについて理論的に求めた結果、クローラトラクタでは 15~37 cm、ホイールトラクタでは 17~48 cm を与えている。スウェーデン地表粗さの分類による障害物の記述では、地表上の突起物および窪地について詳細な規定が示されているが、一般的に地表面から約 25~30 cm 以上の突起物および窪地を障害物として規定している。

集材地の地表障害物の種類は、根株、倒木、枝条等の木質物以外に転石や土塊があり、また小溝、窪地、小山等の微細な地形凹凸も含まれる。さらに間伐林分や択伐林分においては林内の立木もトラクタ集材にとっては障害物となる。これらの地表障害物の出現頻度は、林分の種類や伐採方法によって異なる。

トラクタ走行に対する障害物の頻度は、一応 1000 個/ha を基準として、それぞれ走行難易度を、1000 個/ha 以上を困難、400~1000 個/ha を中程度、400 個/ha 以下を容易としている<sup>22)</sup>。これは障害物の分布状態にもよるが障害物が格子状に規則的配列している場合を考えると、障害物間隔はそれぞれ 3.2 m 以下、3.2~5 m、5 m 以上となり、トラクタ走行幅等を考慮すると、この基準は一応トラクタ走行上の目安となる。

地表障害物の種類と出現頻度に関し、わが国のトラクタ集材を代表する林地として天然林地 (択伐林地

表 6 調 査 地 の

地表障害物		天然林択伐地 No.44 林班 (東大北海道演習林)				
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
立 木	生	304	337	277	222	349
	枯	24	9	33	20	16
	小 計	328	346	310	242	365
倒 木	生	10	15	13	12	2
	生 (半)	21	9	10	17	13
	枯	10	16	16	20	16
	枯 (半)	74	44	83	51	45
	土 化	31	25	10	12	52
小 計	146	109	132	112	128	
根 株	生	3	1	14	16	5
	枯	33	33	34	22	19
	土 化	18	31	19	23	56
	小 計	54	65	67	61	80
枝 条			6	27	38	3
微 地 形 凹 凸		8	8	13	6	17
合 計		536	534	549	459	593
ha 当 り		1031	1027	1056	883	1140

天然林択伐地 100 m × 100 m, その他の調査地は 60 m × 60 m

(東大北海道演習林), 漸伐林地 (伊那宮林署管内)) と, 人工林地 (スギ一斉林地 (沼田宮林署管内), カラマツ間伐林地 (草津宮林署管内)) および皆伐跡地 (岩村田宮林署管内) の各調査地について示すと表 6 のとおりである。調査結果から, 天然林択伐地では, 地表障害物密度は平均 1000~1100 個/ha, 天然林漸伐地では 719 個/ha となり, 一斉人工林地では 1525 個/ha, 間伐地では 625 個/ha となり, 皆伐跡地では 481 個/ha であった。これらの結果からみるとわが国の代表的なトラクタ集材地の地表障害物の出現頻度は, トラクタ走行難易度からみると中~困難の場合となる。また, 地表障害物の種類ごとの出現頻度は, 林分の種類, 伐採前後あるいは伐採方法によって異なるが, 天然林地では立木以外の地表障害物の出現頻度も高く, 倒木, 根株, 枝条, その他転石, 窪地など各種の地表障害物が出現し, 人工林地では, 立木と根株以外の障害物は少ないことがわかる。

次に, 地表障害物の大きさについてみる。まず立木についてみると, その大きさは林分を構成する樹種の違い, あるいは人・天別によって異なることが推察できる。STRAHLER, A.N.<sup>56)</sup> は, 北米における 4 天然林地 (漂石土林地, 粘土沼沢林地, 砂質土林地, ヘムロック林地) のブナ, カバ, カエデ等の樹種の立木径級について測定した結果, 立木の径級は, 対数正規型分布を示すことが報告されている。また熱帯多雨林の天然常緑林の径級や寒帯凍土地の天然林の径級についても非対象の L 型分布あるいは対数正規型の分布を示すという報告がある<sup>56), 57)</sup>。また, 人工林の立木径級は, 一般に正規分布に近似できるが, 現実の林分では被圧木や枯死木があったり, 除・間伐により, 立木間に差ができることから多少歪んだ正規分布型になるという報告<sup>58)</sup>がある。立木の径級に関しては造林学的立場, あるいは林業経営学的立場か

## 障 害 物 の 類 度

No. 6	No. 7	天然林漸伐地 No. 237 林班 (伊那)	人工林伐跡地 No. 67 林班 (岩村田)	一斉人工林地 No. 155 林班 (沼田)	人工林間伐地 No. 144 林班 (草津)
267	403	106	14	460	213
2	7	9	3	48	12
269	410	115	17	508	225
6	28	1			
14	16	3			
23	26	2			
89	71	10	26		
30	54	8		3	
162	195	24	26	3	
2	6	72	110		
34	26	29	8	5	
28	48	9		33	
64	80	110	118	38	
50	9	7	6		
9	18	3	6		
554	712	259	173	549	225
1065	1369	719	481	1525	625

ら幾つかの報告<sup>59),60)</sup> がなされているが、その他の林地地表障害物の大きさに関する報告は少ない。

表7は、各調査地の障害物ごとの面積 (m<sup>2</sup>) と体積 (m<sup>3</sup>) を示したものである。また図5は天然林択伐林、一斉人工林および人工林間伐林の立木の径級分布を示したものである。図から、各林地の径級は、天然林択伐地では平均 14.1 cm、一斉人工林地では平均 19.2 cm、人工林間伐地では平均 20.8 cm (経営木だけでは 27.6 cm) となり、天然林分ではその径級分布は対数正規分布を示し、一斉人工林分では正規分布に近似することができる。しかし、人工林において数度の除・間伐を実施した林分では広葉樹の侵入が促されるため全体の林分の径級分布は、広葉樹の対数正規型分布と人工植栽された立木の正規型分布が複合した分布型となっている。

立木以外の地表障害物の大きさについて天然林択伐地について、それぞれその大きさを示すと図6のとおりである。図から明らかなように、倒木、根株、枝条およびその他障害物の大きさの分布は、対数正規型分布にかなり適合することがわかる。図7は、天然林択伐地における地表障害物の占有面積を示したものである。図は、地表障害物が単位プロット (20 m×20 m) 内に占めた面積 (m<sup>2</sup>) を示したものであるが、調査プロット数 91 について、1プロット当たりの平均占有面積は 27.5 m<sup>2</sup> (占有率は 6.9%) となり、それぞれ立木の場合は、平均 1.4 m<sup>2</sup> (占有率 0.35%)、倒木の場合は 13.7 m<sup>2</sup> (占有率 3.43%)、根株の場合は 1.3 m<sup>2</sup> (占有率 0.33%)、枝条の場合は 11.0 m<sup>2</sup> (占有率 2.75%) およびその他障害物は 1.7 m<sup>2</sup> (占有率 0.43%) となり、倒木や枝条障害物は、ほかの障害物に比べ占有面積が大きいことがわかる。

図8はスウェーデン地表粗さ区分に本調査地の調査結果を適用したものである。ただしここで対象とし

表 7. 調査地の障害物の

地表障害物			天然林択伐地 No.44 林班 (東大北海道演習林)				
			No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
占有面積 (㎡)	立木	生	19.4973	17.7130	14.0667	17.0549	21.0924
		枯	1.7269	0.9878	1.3741	1.1134	0.8377
		小計	21.2242	18.7008	15.4408	18.1683	21.9301
	倒木	生	1.7400	10.0700	4.4705	9.0200	3.0820
		生(半)	5.8900	1.5200	4.7220	3.4000	24.7080
		枯	14.6200	11.6550	14.1640	27.5000	32.7600
		枯(半)	105.1160	74.5350	99.9185	59.6980	86.2950
		土化	64.2960	37.6900	22.3800	19.1750	94.3020
	小計	191.6620	135.4700	145.6550	118.7930	241.1470	
	根株	生	1.0283	0.2826	3.8909	5.9029	0.1850
枯		9.3124	7.0753	8.6088	6.0983	2.9070	
	土化	7.1917	12.7496	7.0925	9.5611	10.4370	
	小計	17.5324	20.1075	19.5922	21.5623	13.5290	
	枝条		12.5500	129.2184	300.3000	21.5700	
	微地形凹凸	12.9785	11.4438	24.7258	11.4969	38.8140	
	合計	236.6860	198.2721	334.6322	470.3205	336.9901	
	ha 当たり	455.1654	381.2925	643.5235	904.4625	648.0579	
体積 (㎡)	倒木	生	0.110	1.086	0.372	0.918	3.357
		生(半)	0.547	0.080	0.497	0.218	18.614
		枯	3.496	1.420	2.516	7.071	21.703
		枯(半)	26.004	18.846	26.746	15.661	44.272
		土化	24.590	20.896	11.612	7.075	31.605
	小計	54.747	42.328	41.747	30.943	119.551	
	根株	生	1.252	0.282	3.582	4.530	0.232
		枯	7.685	7.561	7.232	4.378	3.150
		土化	4.669	8.799	4.371	5.676	8.009
	小計	13.606	16.642	15.185	14.584	11.391	
	枝条		5.507	94.979	318.320	25.974	
	微地形凹凸	7.045	7.444	19.910	8.552	27.069	
	合計	75.398	71.921	171.821	372.399	183.985	
	ha 当たり	144.996	138.310	330.425	716.152	353.817	
	平均	0.363	0.383	0.719	1.716	0.807	

た障害物は立木以外の地表障害物である。図から明らかなように、天然林地では4~5クラスに区分されている。これはトラクタ走行上かなり困難なクラスに当たる。また人工林伐跡地では2~3クラスとなり、トラクタ走行難易度は、中クラスに区分された。これらの結果からみて、トラクタ集材地の地表障害物は、トラクタ走行にとってかなり影響を与えることがうかがえる。さらに間伐や択伐の集材を実行する場合

占有面積と体積

		天然林漸伐地 No 237 林班 (伊那)	人工林伐跡地 No 67 林班 (岩村田)	一斉人工林地 No 155 林班 (沼田)
No 6	No 7			
15.5122	15.8708	3.7945	0.1482	15.7240
0.3348	0.3464	0.2880	0.0191	0.4340
15.8470	16.2172	4.0825	0.1673	16.1580
2.5800	12.2080	0.6250		
5.5380	7.5700	1.2603		
26.9740	24.5540	1.1152		
77.9510	88.4760	10.4130	29.2125	
49.2480	92.1800	16.9620		1.1380
162.2910	224.9880	30.3755	29.2125	1.1380
0.0130	0.7500	23.2658	10.3590	
5.8020	1.6050	10.6500	0.8445	0.2030
6.5420	9.7680	2.8772		1.4470
12.3570	12.1230	36.7950	11.2035	1.6500
468.3300	83.7500	40.7300	10.3750	
23.8560	34.0580	4.5670	4.0800	
682.6810	371.1362	116.5500	55.0383	18.9460
1312.8481	713.7235	323.7500	154.0231	52.6280
2.611	16.644	1.251		
3.622	9.920	1.474		
23.917	22.404	1.072		
43.986	70.678	5.320	15.289	
20.770	42.084	6.205		0.377
94.906	161.730	15.322	15.289	0.377
0.033	0.685	16.810	3.229	
4.760	2.757	6.975	0.351	0.096
5.908	8.938	2.070		0.569
10.701	12.380	25.855	3.580	0.665
322.652	66.550	53.186	8.781	
13.541	24.080	4.689	1.972	
441.800	264.740	99.052	29.622	1.002
849.615	509.115	275.144	82.283	2.783
1.550	0.877	0.688	0.190	0.024

は、林地の立木も障害物となることを考えるとトラクタ走行や集材作業にとって地表障害物は無視できない重要因子といえる。

3.2 地表障害物の分布状態

地表障害物を評価する場合、その密度や大きさとともに障害物が平面的にどのように分布しているかを

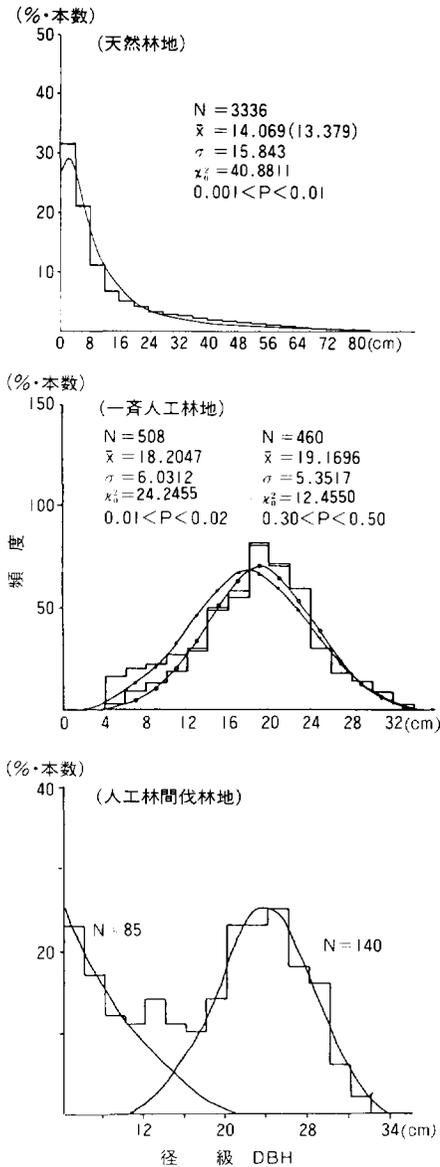


図 5. 立木の径級分布

明らかにする必要がある。

この種の分析手法は、近年計量地理学の分野や森林生態学の研究において確立されつつあり、面域的な広がりや空間的側面での個体事象の分析に用いられている。

地表障害物等の個体の面域内での分布パターンに関する分析手法は、一般に方格法 (Quadrat method) と最近隣単位法 (Nearest neighbor method) がある<sup>61), 62)</sup>。方格法は面域を幾つかのメッシュに分割し、メッシュ内の観測度数をある特定の確率モデルに誘導し、適用しうる確率モデルから分布パターン特性を検討する方法である。また最近隣単位法は個体相互の相対的位置および最近接個体間の距離測定から個体の分布状態を明らかにする方法である。

個体間の面的構成を把握するには、このほかにポテンシャルあるいは情報理論によるエントロピー概念を適用した分析法<sup>63)~67)</sup>もあるが、これらの方法は面域内の現象をアナログカルに把握するものである。これらの方法に対し、ここで取り上げた前述の方法は個体間のデジタル的分析法といえることができる。

ここでは、地表障害物の分布状態について理論的な考察を行い地表障害物の分布状態の表示法について検討した。

個体分布パターンの研究は、KING, L.J.<sup>61)</sup> や YEATES, M.H.<sup>68)</sup> を初めとする都市諸集落の間隔に関する計量地理の分野や CLARK, P.J.<sup>70)</sup> や PIELOU, E.C.<sup>71)</sup> を初めとする動・植物群落に関する生態学の分野<sup>72)~77)</sup> あるいは人間の行動に関する人間工学の分野<sup>63)~65), 78)~80)</sup> 等多くの分野で行われているが、これらの報告の多くはランダム性への適合を主題としている。

個体の立地パターンは、特に自然界では、その個体の生成過程がランダムな場合が多いことを考えるとポアソ

ン確率モデルが前提となる。

林地の地表障害物は、障害物の種類によってその出現の過程は異なり、人為的な伐採や除・間伐を実施した林地や人工植栽林地では、それらの障害物の発生過程はランダムな現象としてとらえにくい。しかし、天然林分などを考えた場合、その発生過程は明らかにランダムな現象といえる。

図9は、トラクタ集材地の地表障害物の分布と適用しうる確率分布モデルについて示したものである。図は、各々 60 m × 60 m の対象地内の障害物の分布を示したものであり、調査地はそれぞれ天然林択伐

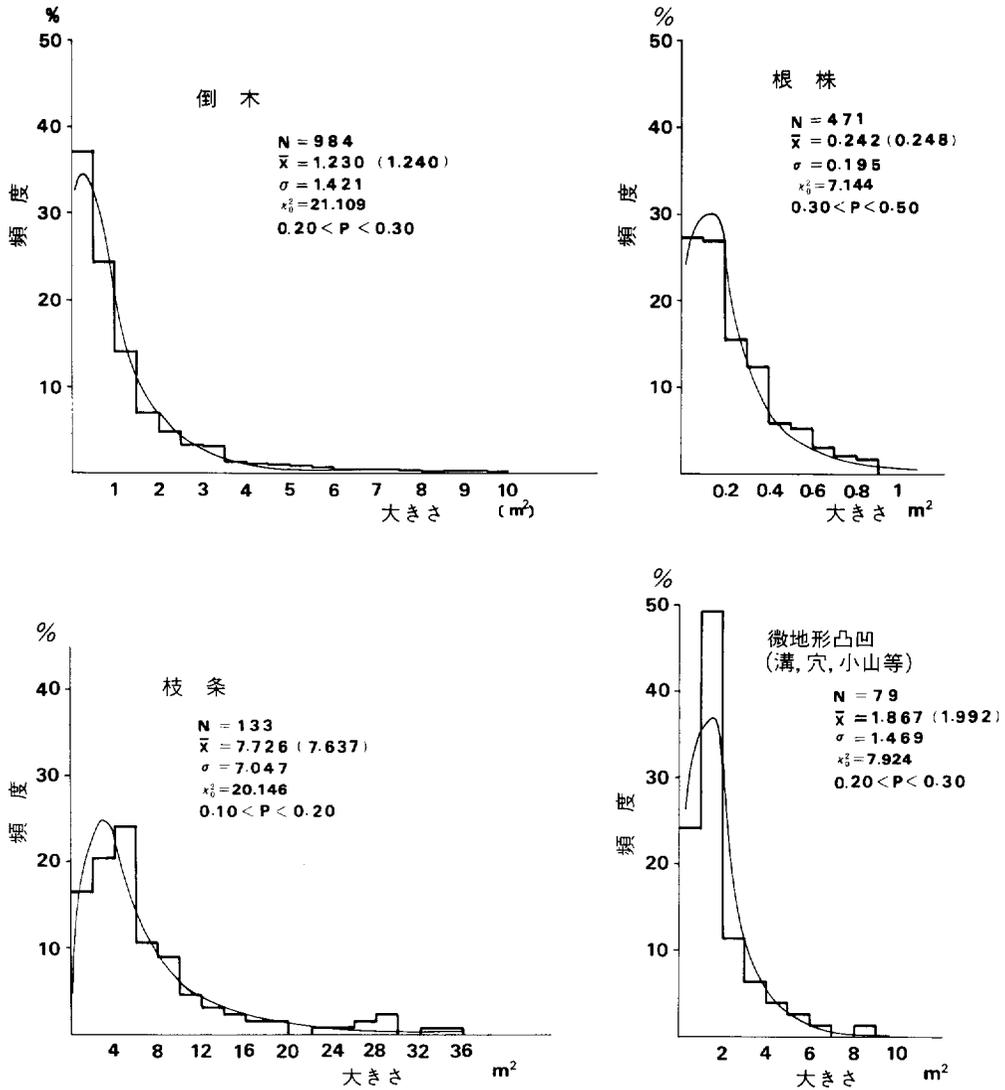


図 6. 地表障害物 (立木以外) の大きさの分布

地. 人工林伐跡地, 一斉人工林地である。図 9 (a) は調査対象地を  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  の単位区画に分割した 144 のメッシュに関して, それぞれの区画に含まれる障害物数を示したものである。図 9 (b) は, その分布の観測度数と適用しうる確率モデルとの適合性を示したものである。適用しうる確率分布モデルとしてポアソン分布, 正規分布, 二項分布, 負の二項分布を取り上げたが, これらの結果, 各調査地の地表障害物の分布とこれらの確率分布モデルとの適合性について示すと表 8 のとおりである。図および表から, 天然林地の地表障害物の分布はポアソン分布に最も適合すること, 一斉人工林地では二項分布あるいは正規分布に適合性が高いこと, また人工林伐跡地ではポアソン分布に従うことがわかった。したがって間伐地については, 間伐の回数が増えるに従って二項分布や正規分布からポアソン分布に変わることが推察される。図 9 (右) は間伐地についてポアソン分布の適合性を示しているが, ほぼポアソン分布に従うことが

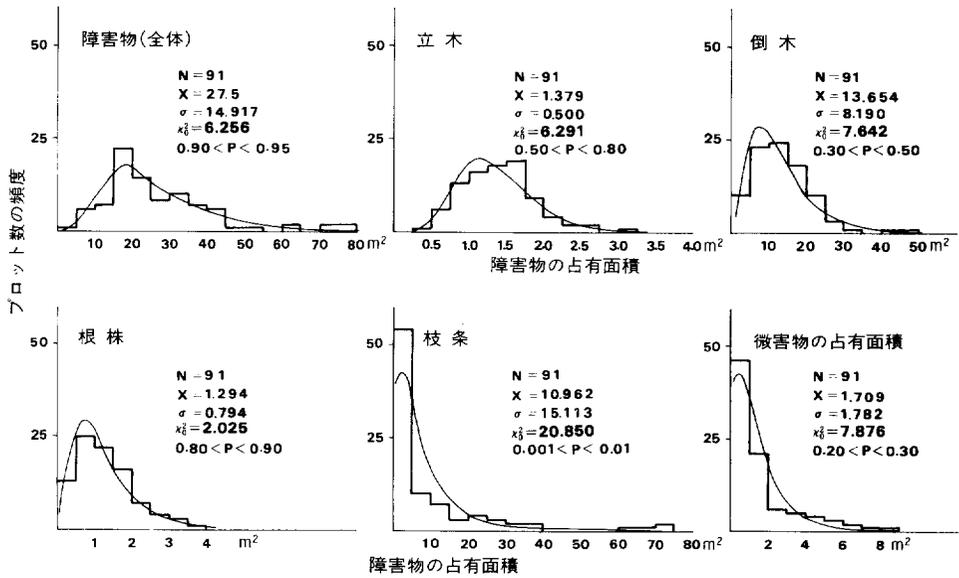


図 7. 単位プロット (20 m × 20 m) 内の占有面積の度数分布

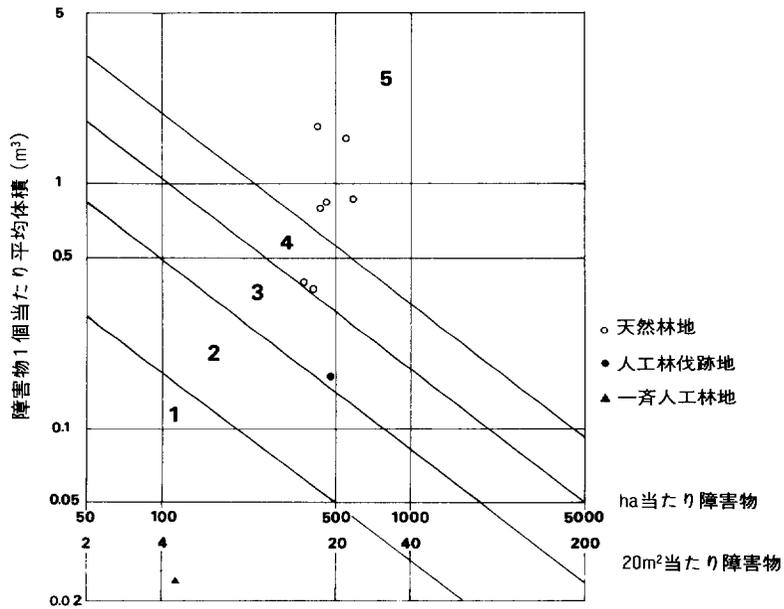


図 8. スウェーデン地表粗さ区分と調査地

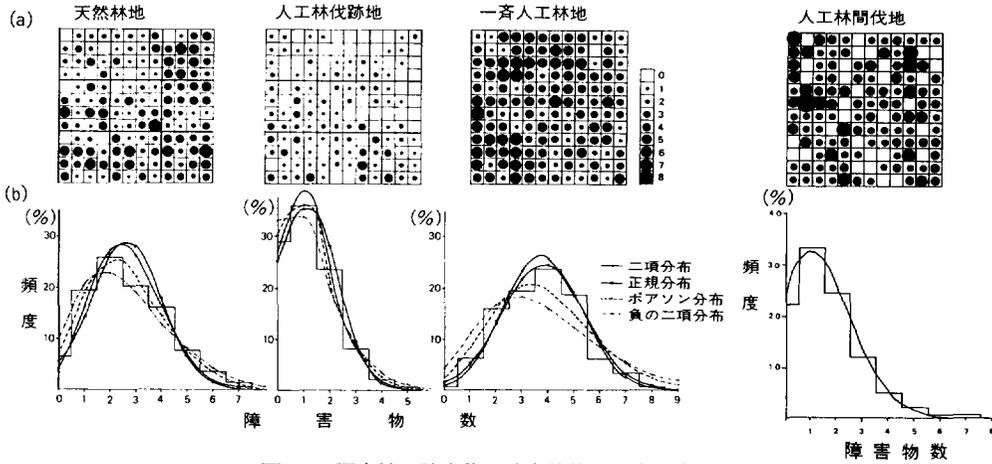


図 9. 調査地の障害物の分布状態と確率分布モデル

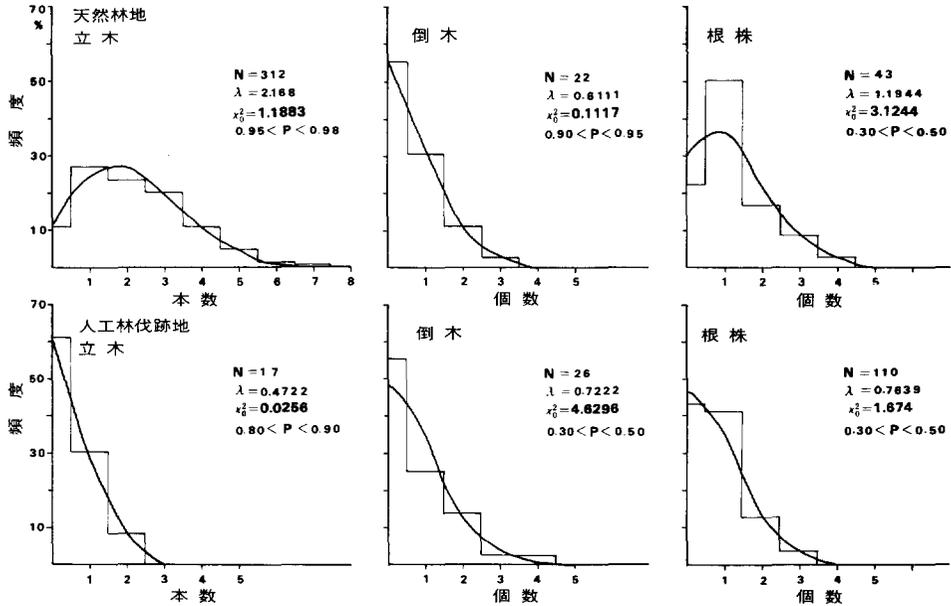


図 10. 調査地の障害物毎の分布状態

わかった。

さらに各調査地について障害物の種類ごとの分布状態をみると図 10 のとおりである。図から明らかにように、天然林地および人工林伐跡地におけるおのおのの障害物の分布はすべてポアソン分布に従い、一斉人工林の立木の分布状態は正規分布になることがわかった。

以上のとおり、トラクタ集材地の地表障害物の分布は、一斉人工林の立木以外は、ほぼポアソン確率モデルに適合できることから、一般の地表障害物の分布は、ランダムな現象を前提として考えると、最近隣単位法によって地表障害物の分布間隔について考察した。

表 8. 調査地の障害物の分布と確率モデルの適合度

	x	f	fx	ポアソン分布		正規分布		二項分布		負の二項分布	
				F	(f-F) <sup>2</sup> /F	F	(f-F) <sup>2</sup> /F	F	(f-F) <sup>2</sup> /F	F	(f-F) <sup>2</sup> /F
天然林地	0	9	0	10.3	0.1641	7.7	0.2195	6.3	1.1571	14.2	1.9042
	1	28	28	27.1	0.0299	20.3	2.9207	23.7	0.7802	29.1	0.0416
	2	37	74	35.8	0.0402	38.2	0.0377	39.2	0.1235	32.9	0.5109
	3	29	87	31.5	0.1981	40.6	3.3143	38.0	2.1316	27.9	0.0818
	4	23	92	20.8	0.2327	25.5	0.2451	23.7	0.0207	18.3	1.2071
	5	11	55	10.9	0.0009	9.4	0.2723	10.0	0.1000	11.0	0.0000
	6	5	30	4.8	0.0083	2.0	4.5000	2.5	2.5000	6.0	0.1667
	7	2	14	1.8	0.0222	0.3	9.6333	0.5	4.5000	2.8	0.2286
	8	0	0	1.0	1.0000			0.1	0.1000	1.3	1.3000
	9									0.7	0.7000
10									0.2	0.2000	
計		144	380	144.0	$\nu=7$ $0.95 < p < 0.98$ 1.6964	144.0	$\nu=5$ $p < 0.01$ 21.1429	144.0	$\nu=7$ $0.10 < p < 0.20$ 11.4131	144.0	$\nu=9$ $0.70 < p < 0.80$ 6.3409
人工林伐跡地	0	42	0	43.3	0.0390	36.7	0.7654	38.5	0.3182	47.5	0.6368
	1	52	52	52.0	0.0000	51.2	0.0125	55.9	0.2721	48.6	0.2379
	2	34	68	31.3	0.2329	40.4	1.0139	34.7	0.0141	28.5	1.0614
	3	12	36	12.5	0.0200	13.6	0.1882	12.1	0.0008	12.4	0.0129
	4	3	12	3.8	0.1684	2.0	0.5000	2.6	0.0615	5.0	0.8000
	5	1	5	0.9	0.0111	0.1	8.1000	0.2	3.2000	1.5	0.1667
	6	0	0	0.2	0.2000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.4	0.4000
	7									0.1	0.1000
計		144	173	144.0	$\nu=5$ $0.98 < p < 0.99$ 0.6714	144.0	$\nu=4$ $0.02 < p < 0.05$ 10.5800	144.0	$\nu=5$ $0.50 < p < 0.70$ 3.8667	144.0	$\nu=6$ $0.50 < p < 0.70$ 3.4157
一斉人工林地	0	1	0	3.2	1.5125	2.7	1.0704	1.0	0.0000	6.0	4.1667
	1	9	9	12.1	0.7942	7.7	0.2194	6.7	0.7895	16.0	3.0625
	2	23	46	23.1	0.0004	18.9	0.8894	19.6	0.5898	23.9	0.0339
	3	28	84	29.4	0.0667	31.3	0.3479	33.7	0.9641	26.1	0.1383
	4	34	136	28.0	1.2857	35.4	0.0554	37.1	0.2590	23.1	5.1433
	5	27	135	21.4	1.4654	27.2	0.0015	27.2	0.0015	17.7	4.8864
	6	16	96	13.6	0.4235	14.3	0.2021	13.4	0.5045	12.6	0.9175
	7	5	35	7.4	0.7784	5.1	0.0020	4.2	0.1524	7.7	0.9468
	8	1	8	3.5	1.7857	1.2	0.0333	0.8	0.0500	4.6	2.8174
	9	0	0	1.5	1.5000	0.2	0.2000	0.3	0.3000	2.9	2.9000
	10			0.8	0.8000					1.3	1.3000
	11									1.2	1.2000
12									0.9	0.9000	
計		144	549	144.0	$\nu=9$ $0.30 < p < 0.50$ 10.4125	144.0	$\nu=7$ $0.80 < p < 0.90$ 3.0215	144.0	$\nu=8$ $0.80 < p < 0.90$ 3.6108	144.0	$\nu=11$ $0.001 < p < 0.01$ 28.4128

任意の障害物から最寄りの障害物に対し近い順に第1位、第2位……第j位の障害物までの距離の分布は、障害物の分布状態がランダムであるとする、その確率密度関数  $P(\gamma_j)$  は次式で表される。

$$P(\gamma_j) = 2(\lambda\pi)^j \gamma_j^{2j-1} e^{-\lambda\pi\gamma_j^2} d\gamma_j / (j-1)! \dots\dots\dots(2.11)$$

ただし、 $\gamma_j$ : 第j位の最近隣距離、 $\lambda$ : 障害物密度。すなわち、第j位番目の障害物間の最近隣距離の期待値 (平均)  $\bar{\gamma}_j$  は (2.11) 式から  $\gamma_j$  について  $0 \sim \infty$  を積分することによって次式が得られる。

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_j &= \int_0^\infty \gamma_j \cdot P(\gamma_j) \\ &= \frac{j}{\sqrt{\lambda}} \cdot \frac{(2j)!}{(2^j j!)^2} \quad (j = 1, 2, 3, \dots, j) \dots\dots\dots(2.12) \end{aligned}$$

$$\bar{\gamma}_1 = \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} \quad (j = 1) \dots\dots\dots(2.13)$$

図11は、天然林択伐地および人工林伐跡地の地表障害物について、障害物間の第5位までの最近隣距離の分布と式 (2.11) の理論値について示したものである。また表9は、その実測値と理論値の適合度を示したものである。図や表から、障害物間の最近隣距離は、障害物の密度 ( $\lambda$ ) が大きい程小さくなり、序列順位数 ( $j$ ) が大きい程大きくなるのがわかる。また両調査地とも地表障害物の最近隣の間隔の分布は式 (2.11) に示す確率関数に、きわめて適合度が高いことがわかる。

そこで、この最近隣距離を用いて面域内の地表障害物の配置パターンについてみる。個体分布パターンの判定としては、一般に個体間の第1位の平均最近隣距離 (最近隣単位) が適用され、次の指数 ( $R$  値) により判別が可能となる。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i}{N} / \bar{\gamma}_1 \text{ (観測値の平均/理論値の平均)} \dots\dots\dots(2.14)$$

ただし、 $\sum_{i=1}^N \gamma_i$ : 最寄りの個体間の距離の総和、 $N$ : 個体数。

$$\begin{aligned} R \text{ 値} \rightarrow 0 & \quad \text{集塊パターン} \\ R \text{ 値} \rightarrow 1 & \quad \text{ランダムパターン} \dots\dots\dots(2.15) \\ R \text{ 値} \rightarrow \frac{2^{3/2}}{3^{1/4}} \text{ (=2.1491)} & \quad \text{拡散パターン} \end{aligned}$$

しかし、トラクタの走行やトラクタ集材路の導入といった連続するものに対しては、第1位の平均最近隣距離だけによる判定では不十分であり、第2位以上についても考慮した判定法が必要となる。

そこで第j位番目の障害物間の平均最近隣距離  $\bar{\gamma}_j$  は、式 (2.12) からスターリング近似により簡単にすると

$$\bar{\gamma}_j = \sqrt{\frac{1}{\pi}} \left(\frac{j}{\lambda}\right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.16)$$

となり、最近隣単位に対する第j位の平均最近隣距離は

$$\bar{\gamma}_j / \bar{\gamma}_1 = \sqrt{\frac{j}{\lambda\pi}} / \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} = 2\sqrt{\frac{j}{\pi}} = 1.1287\sqrt{j} \dots\dots\dots(2.17)$$

となり、円周上に第j位番目の障害物がある円の面積は、最近隣単位円の約j倍となり、それぞれ序列順位数間の環状同心円の面積はほぼ等面積となる。

図12は、序列順位数と順位数ごとの平均最近隣距離の関係を示したものである。図は各調査地を単位プロット (20 m × 20 m) に分割し、9プロットについて、第10位番目までの最寄りの障害物間の距離を

表9. 調査地の最近隣距離の

調査地	x	j=1			j=2		
		f	F	$(f-F)^2/F$	f	F	$(f-F)^2/F$
天然林地	0-1	118	114.8	0.0892	23	22.8	0.0018
	1-2	132	125.3	0.3583	124	111.9	1.3084
	2-3	35	45.5	2.4231	73	81.2	0.8281
	3-4	8	7.8	0.0051	27	28.9	0.1249
	4-5	1	0.6	0.2667	2	4.0	1.0000
	5-6				0	0.2	0.2000
	6-7						
	Total		294	294.0	3.1424	249	249.0
人工林伐跡地	0-1	16	16.0	0.0000	1	1.4	0.4000
	1-2	38	35.7	0.1482	8	10.0	0.4000
	2-3	27	25.6	0.0766	22	19.3	0.3777
	3-4	12	13.4	0.1463	20	18.9	0.0640
	4-5	4	4.9	0.1653	10	10.9	0.0743
	5-6	0	1.2	1.2000	4	4.2	0.0095
	6-7	0	0.2	0.2000	1	1.1	0.0091
	7-8				0	0.2	0.2000
	8-9						
	9-10						
	Total		97	97.0	1.9364	66	66.0

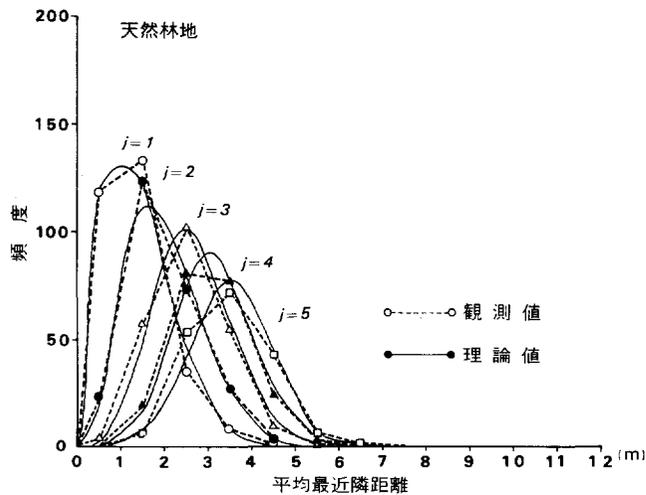


図 11. 調査地の第1位～第5位の最近隣距離の分布と理論分布

計測したものであるが、各順位数の平均最近隣距離は、序列順序数が大きくなるに従って対数的増加傾向を示し、障害物密度が小さいプロットほど増加傾向が大きくなることから縦軸に序列順位数ごとの平均最近隣距離  $(\sum_{i=1}^N r_{ji}/N)$  をとり、横軸に序列順位数を障害物密度で割った値

分布と理論分布の適合度

j=3			j=4			j=5		
f	F	$(f-F)^2/F$	f	F	$(f-F)^2/F$	f	F	$(f-F)^2/F$
3	3.1	0.0032	0	0.3	0.3000	0	0.0	0.0000
58	50.1	1.2457	19	17.2	0.1884	6	4.6	0.4261
102	101.9	0.0001	81	76.8	0.2297	53	44.1	1.7961
54	58.6	0.3611	76	78.8	0.0995	72	77.5	0.3903
9	12.3	0.8854	24	26.4	0.2182	42	44.6	0.1516
1	1.0	0.0000	3	3.3	0.0273	5	7.6	0.8895
			0	0.2	0.2000	1	0.6	0.2667
227	227.0	2.4955	203	203.0	1.2631	179	179.0	3.9203
0	0.1	0.1000	0	0.0	0.0000	0	0.0	0.0000
1	2.1	0.5762	0	0.3	0.3000	0	0.0	0.0000
7	9.1	0.4846	1	2.5	0.9000	1	0.6	0.2667
20	16.0	1.0000	11	8.7	0.6080	4	3.7	0.0243
14	14.8	0.0432	14	12.6	0.1556	10	8.1	0.4457
7	8.2	0.1756	9	10.2	0.1412	9	8.3	0.0590
3	2.9	0.0034	3	4.9	0.7367	4	5.5	0.4091
1	0.7	0.1286	2	1.4	0.2571	1	2.1	0.5762
0	0.1	0.1000	1	0.4	0.9000	0	0.6	0.6000
			0	0.1	0.1000	0	0.1	0.1000
54	54.0	2.6116	41	41.0	3.9986	29	29.0	2.4810

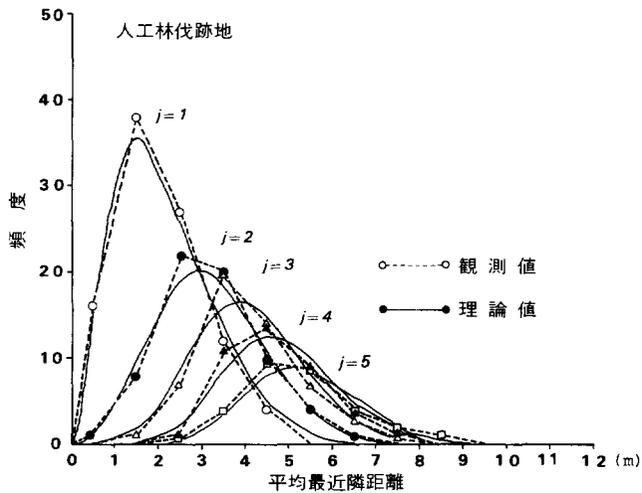


図 11. つづき

( $j/\lambda$ ) をとり、各調査地についてプロットすると図 13 のとおりとなり、各調査地について次の関係式を得た。

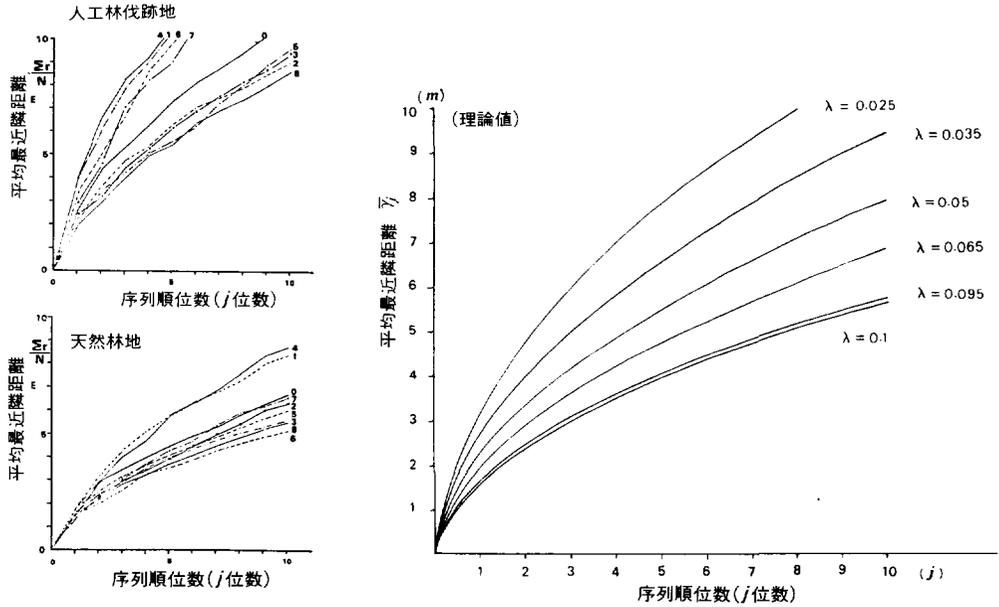


図 12. 序列順位数とその平均最近隣距離の関係

$$\left. \begin{aligned} \text{天然林伐跡地} \quad \sum_{i=1}^N \gamma_{ji} / N &= 0.4187 (j/\lambda)^{0.5955} \\ \text{人工林伐跡地} \quad \sum_{i=1}^N \gamma_{ji} / N &= 0.4564 (j/\lambda)^{0.6079} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\therefore \sum_{i=1}^N \gamma_{ji} / N = a (j/\lambda)^b \dots\dots\dots (2.19)$$

すなわち、j 番目の平均最近隣距離は式 (2.19) の関係で表されることになり、両調査地の係数 b はほぼ 1/2 に近似できることから、理論値から得た式 (2.16) の係数に一致する関係が得られた。そこで、第 2 位以上の最近隣距離の関係を考慮した場合の分布状態の判定に対する指数 (R<sub>j</sub> 値) は次式 (2.20) のとおりである。

$$R_j = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_{ji}}{N} / \bar{\gamma}_j \doteq a \sqrt{\pi} \dots\dots\dots (2.20)$$

すなわち、係数 a により、次のとおり分布状態の判定が可能となる。

$$\left. \begin{aligned} a \rightarrow 0 & \quad \text{集塊分布} \\ a \rightarrow \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (=0.5642) & \quad \text{ランダム分布} \\ a \rightarrow \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{2^{3/2}}{3^{1/4}} \quad (=1.2126) & \quad \text{拡散分布} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2.21)$$

図 13 の各直線は、それぞれ a の値が 0.2821, 0.5462 および 1.2126 の場合を示しているが、図からわかるように天然林地ではほぼランダム分布の直線上にプロットされている。しかし人工林伐跡地では、第 1 位の場合はランダム分布であるが、j 位数が大きくなるに従って拡散分布になり、全体的にみると拡散分布に近いことがわかる。

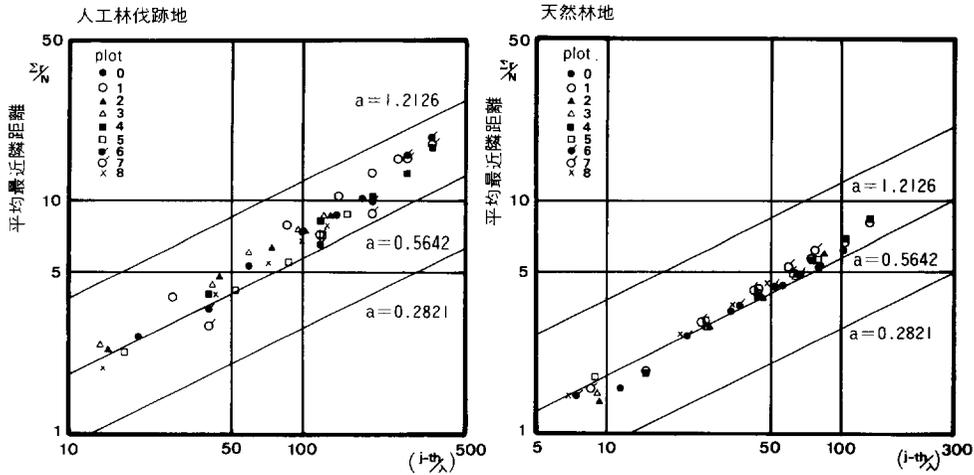


図 13. 序列順位数 (j 位数) と障害物密度  $\lambda$  および平均最近隣距離の関係

要するに、面域内の障害物間の関係をより正確に把握するためには最近隣単位からだけでなく第 2 位以上の最近隣距離の関係についても考慮する必要がある。

以上論じたようにトラクタ集材に対する地表障害物の記述表示は、障害物の密度と大きさおよび分布状態が中心となる。

#### 第 4 節 地表状態の記述表示と評価

トラクタ集材現場の地表状態の評価は、トラクタ走行に関するトラフィカビリティ (trafficability) の問題が対象となり、トラクタの走行性やけん引性に対する地表ごとの粘着力や走行抵抗の係数値が分類記述に適用できる。一般にこれらの値は集材地の地表条件、例えば森林型、土質、含水状態、下層植生の有無等とトラクタ機種 (走行装置の違い) によって推定が可能となる。

スウェーデン地表状態の分類<sup>2)</sup>では、その記述因子として森林型、土質および含水状態を取り上げ分類表示している。

わが国において地表状態として問題となるのは、主に軟弱地や降雨後の泥濘状態であり、この種の特異な場合を除いては、トラクタ集材作業の難易性に対するものよりもむしろトラクタ集材が林地土壌の攪乱や下層植生に与える影響について取り上げる場合が多い。

いずれにしても、地表状態の評価は、特異な場合を除いては、平坦地ではあまり問題にならず、地形傾斜や微地形等の地形因子との関連において問題となる場合が少なくない。

ここでは WES (Waterways Experiment Station) のトラフィカビリティ評価法<sup>81)~83)</sup>を中心に地表状態の記述表示を行った。

地表状態に対するトラクタの通行の成否を判定するものとして地表の地耐力がある。これはトラクタの走行に耐える地表の支持力であり、STEINLIN, H.<sup>5)</sup> はトラクタ等の車輛類による集材に対する地表状態の分類としてこの地耐力により集材地を区分している。それによると通常の車輛通行が可能である地表の許容支持力は  $4 \text{ kg/cm}^2$  以上であり、車輛の通行が全く不可能となる限界は  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  であることを示している。これらの値をわが国の地表状態に適用すると、 $0.5 \text{ kg/cm}^2$  の値は、湿地や泥濘化状態の

地表であり、 $4 \text{ kg/cm}^2$  の値は統一土質分類によるとかなり軟弱な地盤を示すことになる。

トラクタの推進力や走行能力は土の剪断抵抗によって決まるということを前提とした WES の評価法は、トラクタの走行に影響を与える地表の限界層（臨界層、普通の土質では  $15\sim 30 \text{ cm}$  の深度）の評価コーン指数（RCI）とトラクタの諸元から得られる車輛コーン指数（VCI）の関係から、トラクタがその地表を通行可能か否かの判定をする方法である。

林地の地表の支持力についての評価コーン指数は、自然土のコーン指数にトラクタが走行したことによる土の強度の減少比（こね返し指数）を乗じた値である。

表 10 は、天然林調査地（択伐地（東大北海道演習林）、漸伐地（伊那営林署管内））について、地表からの深度ごとのコーン指数の測定結果である。表から両調査地とも深度が増すにつれてコーン指数も増大するが、WES のいう限界層附近のコーン指数をみると両調査地とも、ほぼ  $4\sim 5 \text{ kg/cm}^2$  となる。この値は STEINLIN の地耐力による地表状態の区分では通常の車輛に対して通行可能となる。しかし WES の評価法では、この自然土のコーン指数に“こね返し指数”が乗じられるので、評価コーン指数はさらに小さくなることが考えられる。したがってわが国の林業用トラクタの車輛コーン指数はほぼ  $3\sim 4 \text{ kg/cm}^2$  であることを考えると、こね返し指数が 1 以下では通行が不可能となる場合も考えられる。

CHAPPELL, T.W.<sup>84)</sup> は、このこね返し指数に対し含水率の高い混交林地や広葉樹林地では、トラクタの 2~3 回の走行に対し自然土の強度の  $1/2\sim 1/4$  に減少することを報告している。一般に“こね返し指数”は、（自然土含水比—液性限界）の値が大きい程小さくなり、その差が -20% 以下ではこね返し指数は 1 以上となる<sup>85)</sup>。また液性限界は、一般に砂質ロームで約 25%、砂質粘土ロームで約 30%、シルトで約 35%、シルト質粘土で約 45%、粘土で約 55% 以上の値が示されている<sup>85)</sup>。したがって乾燥した林地では、こね返し指数は 1 以上になることが多い。

図 14 は、天然林漸伐地におけるトラクタ集材跡地の地表のコーン指数について集材路上および林内に

表 10. 深度別の地表の支持力

調査地	試験地	コーン指数 (kg/cm <sup>2</sup> )				平均	平均傾斜 (%)
		深 さ (cm)					
		表 層	10	20	30		
天然林 択伐地	Na 1	3,894	2,076	3,120	5,061	3,538	15.8
	Na 2	3,086	3,990	4,244	5,562	4,221	6.5
	Na 3	3,107	3,075	4,032	5,592	3,952	8.1
	Na 4	4,914	3,803	4,117	6,041	4,640	8.6
天然林 漸伐地	Na 1	1,262	3,493	4,041	4,411	3,302	31.8
	Na 2	2,143	4,101	4,125	5,222	3,898	35.0
	Na 3	1,925	2,875	2,357	4,143	2,825	46.0
	Na 4	2,243	3,534	3,286	4,816	3,470	55.0
	Na 5	1,537	3,054	3,329	5,354	3,319	55.0
	Na 6	2,909	3,960	4,143	4,347	3,840	24.8
	Na 7	2,186	3,942	3,852	5,222	3,801	28.3
	Na 8	1,340	3,801	3,925	5,150	3,557	28.3
	Na 9	1,901	3,081	4,437	6,288	3,927	28.3

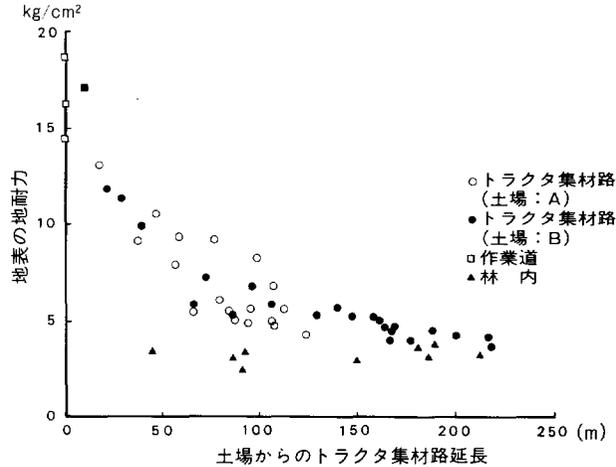


図 14. トラクタ集材跡地の地耐力

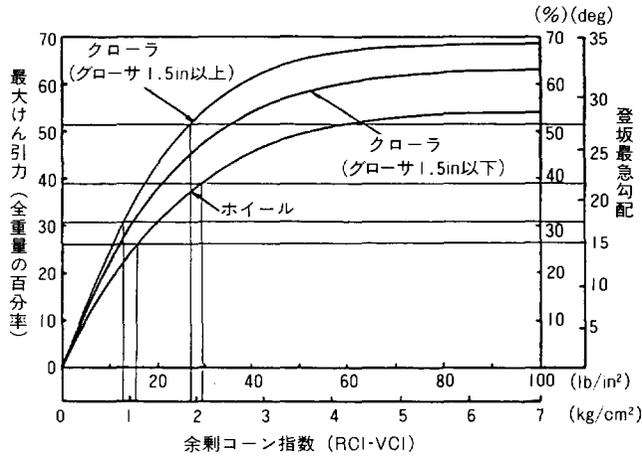


図 15. WES の評価法による調査地の登坂最急勾配の評価値

ついて示したものである。図は、土場からの集材路延長を横軸にとり、それぞれの箇所のコーン指数を示したものである。ただし、コーン指数は表層～深度 30 cm の平均値である。図からコーン指数は集材走行回数の多い土場附近ほど大きく、林内末端部になるに従って、指数関数的に減少する関係がわかる。すなわち土の支持力は一般の林地ではトラクタの通行回数が増すにつれてむしろ大きくなり、地表状態の評価は、軟弱地の場合や地形傾斜との関連において問題となる場合が多い。

佐野<sup>86),87)</sup>は、地表の地耐力は地形傾斜が急になる程低下することを示し、トラクタの登坂や横すべり等に関連づけているが、WES の評価法では、余剰コーン指数（評価コーン指数と車輛コーン指数の差）と最大けん引力およびトラクタの最急登坂勾配の関係を示した。図 15 は本調査地について適用したものである。ただし、こね返し指数はそれぞれ 1 とした場合である。図からそれぞれ一般に使用されている林業用トラクタ 6～7t のクラスのクローラトラクタ (CT-35) とホイールトラクタ (T-50) の最大けん引力および最急登坂勾配をみると、評価コーン指数 4～5 kg/cm<sup>2</sup>、車輛コーン指数 (3.1 kg/cm<sup>2</sup> (ク

ローラ型)、 $2.9 \text{ kg/cm}^2$  (ホイール型)) から、余剰コーン指数はそれぞれ  $0.9 \sim 1.9 \text{ kg/cm}^2$  と  $1.1 \sim 2.1 \text{ kg/cm}^2$  となり、最大けん引力および最急登坂勾配はおおのクローラトラクタでは  $2123 \sim 2493 \text{ kg}$ 、 $17 \sim 27.5^\circ$  となり、ホイールトラクタでは  $1670 \sim 2506 \text{ kg}$ 、 $15 \sim 22^\circ$  となる。

以上のように、トラクタ走行が可能な地耐力は集材用トラクタに対し一応コーン指数が  $4 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$  を目安と考えると、わが国の集材地のトラクタ集材では、特殊な地表状態 (湧水箇所や降雨後の泥濘状態) を除いては、最小に見積っても  $15^\circ \sim 17^\circ$  の傾斜地は走行可能となることから、地表状態を考慮した場合の地形条件として一応地形傾斜  $15^\circ$  が目安と考えられる。

### 第 III 章 トラクタ集材地形の地形分類

#### 第 1 節 緒言

伐出作業に対して、適切な技術システムを選定するためには集材地の地形条件を定量化し、種々な集材現場に対し客観的かつ統一的に適用が可能な地形分類表示が必要である。

森林利用学的立場からみたトラクタ集材のための地形分類システムは、林地にトラクタを導入する際の様々の発生事象に対する評価を主題としており、トラクタ走行や集材けん引等に影響を与える地形や地表の質的あるいは形態の特徴を相互に関連づけることにある。

トラクタが林地を走行し、あるいは集材けん引を可能にするためには、使用トラクタの特性と林地条件がある範囲において互いに許容し合うことを意味している。トラクタ集材に対する地形区分は、まさにこの許容し合える範囲を見出し、トラクタの特性に応じて林地条件を記述表示し、集材作業の難易に従って表示区分することにほかならない。

ここでは、前章において得た諸事象や諸評価値を基に、トラクタが林地を走行する際の林地条件と走行難易性の関係について電算機を用いたシミュレーション技法により検討し、トラクタ走行難易度によるトラクタ集材地の地形分類の方法を明らかにした。またトラクタ集材地形を概括的に把握表示する方法としてトラクタ地形指数を算定し、実際の集材現場への適用について検討した。

#### 第 2 節 トラクタ地形分類のためのシミュレーション手法概要

集材現場にとって、トラクタ作業を可能にするためには、まずトラクタ自身が林地を自由に走行できることが必要である。

トラクタが林地を目的地に向かって走行を可能にするためには、林地の地形傾斜がトラクタの登坂能力や前後・左右方向の転倒へと安全性に対して、条件を満足する勾配であることが前提となる。また、このような条件を満す林地であっても、トラクタの通行にさまたげとなる地表障害物が多く出現する林地あるいはボリュームの大きい障害物が広く分布した林地ではトラクタの走行は不可能となるし、さらに湧水や降雨後の泥濘化した地表状態を有した林地や軟弱な土質を有する林地ではトラクタの走行は困難なものとなる。

トラクタが目的地に向かって走行を全く不可能とするためには、このような地形や地表の条件が林地をあます所なく被覆してしまった状態であり、このような集材林地では、トラクタによる集材作業も不可能なものとなる。しかし、多くの場合このような悪条件が林地全面を覆うことは少なく、トラクタは、走行可能な条件を林内の各所に探して目的地に走行することになる。なお地形・地表条件がトラクタの走行に対して全く許容内で構成されている林地では、トラクタは目的地に容易に最短距離で進行することが可能と

なる。

以上のことから、トラクタが林地を走行する際の林地条件に対する難易性は目的地への“行きにくさ”と考えられ、ここでは難易度を“到達のしにくさ”と定義し、各種の想定林地モデルにおける到達難易度を算定することによりトラクタ地形の地形分類を行った。想定林地条件は前節までに述べてきたスウェーデン地形区分の記述因子に準じた、地形傾斜、地表障害物の密度と大きさおよび分布状態、地表状態を取り上げた。

以下モデル組み立ての前提と仮定について当該目的に關与する要素を取り上げその概要を述べる。

2.1 トラクタ走行の難易度

トラクタが林地を目的地に向って走行するとき、林地の条件が良い場合、すなわち、平坦～緩斜地で地表障害物の出現頻度が低く、さらに堅固な地表状態を有した林地ではトラクタは目的地に容易に到達することができる。しかし地形が急傾斜であったり、障害物が多かったり、また地表の支持力が低い林地では、トラクタは目的地への到達は困難をきたすことになり、トラクタは通行可能な地点を林内の各所に探索して迂回しながら目的地に向うことになる。すなわち、トラクタ走行に対する“到達のしにくさ”は、目的地への最短距離に対する迂回した径路の延長距離の比率で表されることになり、迂回率の概念により定義することができる。なお、トラクタが地表障害物間を走行する場合のシミュレーションの方法について、幾つかの探索手法が示されているが<sup>24),25),28),88)</sup>、ここでは対象地全体を網羅するすべての格子点をトラクタ通過予定点とし、これらの点を順次選定する最短径路の探索手法を用いることにした。

まず格子点を通り、始点から目的点まで行く場合の“到達しにくさ”の最大値について検討した。目的点まで到達することができる場合の到達しにくさの最大は、格子網上を辿る場合となることから、いま、格子線上の2点 P, Q があるとき、P から Q まで格子線上を通過してゆく場合の経路の長さを  $L'(P, Q)$  とし、これを P, Q の2点を結ぶ直線  $\overline{PQ}$  で割った値を  $l(P, Q)$  とすると、 $l(P, Q)$  は P から Q への“行きにくさ”の程度となり、この場合の走行難易度  $\eta$  (%) は次のとおりである。

$$\eta = \left( \frac{L'(P, Q)}{\overline{PQ}} - 1 \right) \times 100 = (l(P, Q) - 1) \times 100 \dots\dots\dots(3.1)$$

そこで、この  $l(P, Q)$  の最大値についてみる。まず図 16 より、格子点を整数座標とする点に、P は  $x$  軸上の区間  $[0, 1]$  上にあり、Q は第1象限にある場合、P の座標を  $(\delta, 0)$ 、Q の座標を  $(x, y)$  とすると、 $0 \leq \delta \leq 1, x \geq 0, y \geq 0$  であり、 $x, y$  の少なくとも一方は整数であり、 $x$  は次の二つの場合が考えられる。

①  $x \geq 1$  場合

図 16 (a) から、この場合は P から Q まで格子線上を縦座標、横座標とも単調増加であるように通ってゆくことができるから

$$\begin{aligned} L'(P, Q) &= (x - \delta) + y \\ \overline{PQ} &= \sqrt{(x - \delta)^2 + y^2} \end{aligned} \dots\dots\dots(3.2)$$

となり、 $x - \delta = t$  とおくと

$$2(t^2 + y^2) = (t + y)^2 + (t - y)^2 \geq (t + y)^2 \dots\dots\dots(3.3)$$

となり、したがって  $l(P, Q)$  は

$$l(P, Q) = (t + y) / \sqrt{t^2 + y^2} \leq \sqrt{2} \dots\dots\dots(3.4)$$

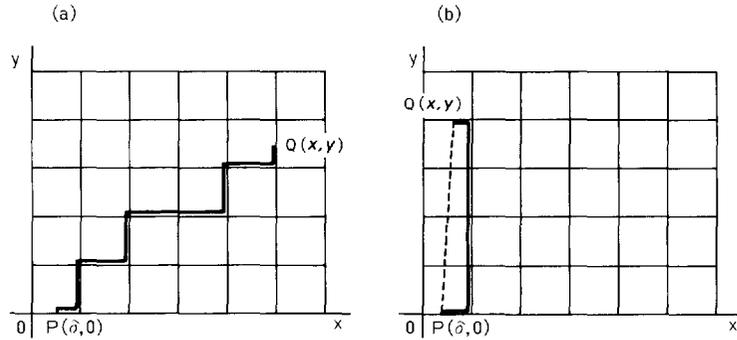


図 16. トラクタ走行の難易度

となり、 $l(P, Q)$  の最大値は  $\sqrt{2}$  となる。

②  $0 \leq x \leq 1$  の場合

この場合は、 $y$  は正の整数であり、図 16 (b) からわかるように

$$\begin{aligned} L'(P, Q) &= y + \min(x + \delta, (1-x) + (1-\delta)) \\ \overline{PQ} &\geq y \end{aligned} \dots\dots\dots(3.5)$$

となり、 $0 \leq x + \delta \leq 2$  であるから

$$l(P, Q) \leq 1 + \min(x + \delta, 2 - (x + \delta)) / y \leq 1 + \frac{1}{y} \leq 2 \dots\dots\dots(3.6)$$

となり、 $l(P, Q)$  の最大値は 2 となる。

以上のことから、始点から格子点を経て目的点までの到達するための走行難易度  $\eta$  の最大は、格子線上を辿る場合であり、始点  $P$  と終点  $Q$  の位置関係により  $\eta$  は次のとおりである。

- ①  $x \geq 1$        $\eta = (\sqrt{2} - 1) \times 100 = 41.4\%$  .....
- ②  $0 \leq x \leq 1$        $\eta = (2 - 1) \times 100 = 100\%$  .....

すなわち、この値以上では目的点への通行は不可能となり、この値が目的点へ到達が可能な場合の最大走行難易度を示すこととなる。

本シミュレーションでは想定林地に対し、始点  $P$  と終点  $Q$  をそれぞれ変えて 6 通り行い、各始点と終点間の走行に対してその走行難易度を算定した。

2.2 林地条件の設定

トラクタの走行に影響を与えている林地条件として地形傾斜、地表障害物、地表状態を取り上げ、想定林地を設定した。以下、仮定と条件について概略する。

(1) 地形傾斜の設定

集材地の地形傾斜の記述は、第 II 章で述べたとおり、対象面域の平均傾斜によって表されるが、傾斜度の分散や面域内での傾斜分布の状態あるいは傾斜方向の分布の違いによって同一の平均傾斜でも多様な地形傾斜断面が形成される。ここでは、ある仮定をもとに平均傾斜とその傾斜の分散および傾斜方向から逆に林地の地形モデルを作成した。

地形モデルの地表面の標高は、原地形の地形図から平均傾斜を算定する方法を逆に利用した方法により算出が可能となる。対象地の地形図に任意の間隔の格子網を覆うと、各メッシュごとの傾斜方向や全体の傾斜の分布がわかり、平均傾斜やその分散が得られる。対象地の地形状況は、これらの要素がわかれば一

応、その特徴をとらえることができることから、いま傾斜の分布がわかり、さらに地形の特徴としてメッシュごとの傾斜方位や平均傾斜およびその分散がわかることによって、与えられた条件に類似した地形モデルおよびその地表面の標高を算出することが可能である。

ここでは、地形傾斜を構成する要因として次のような因子を取り上げ、想定地形傾斜モデルを設定した。

① 平均傾斜  $\theta$  と分散  $\sigma_\theta^2$  およびその分布型の設定

対象林地の傾斜の度数分布は、各種の地形によって異なるが平均傾斜を中心に、ある歪度をもって正規分布型に近い分布をすることが知られている<sup>56),89)</sup>。まず平均傾斜とその分散により正規分布に従う傾斜の分布から対象地を覆う格子点の標高を算定した。

図 17 (a) より、対象地を覆う  $(M, N)$  の行列格子に対し、 $(i, j)$  グリッドにおける地形傾斜  $A(i, j)$  (%) とその 4 隅の格子点の標高  $(G1 \sim G4)$  には次の関係が成り立つ。

$$A(i, j) = 100 \times \tan \theta_{(i, j)} = \frac{100}{\sqrt{2} \epsilon} \sqrt{(G4 - G2)^2 + (G3 - G1)^2} \quad \dots (3.8)$$

$$\tan \theta_{(i, j)} = \sqrt{p(i, j)^2 + q(i, j)^2} = \frac{1}{\sqrt{2} \epsilon} \sqrt{(G4 - G2)^2 + (G3 - G1)^2}$$

$$p(i, j) = \{(G2 + G3) - (G1 + G4)\} / 2\epsilon \quad \dots (3.9)$$

$$q(i, j) = \{(G3 + G4) - (G1 + G2)\} / 2\epsilon$$

$$\therefore G3 = G1 \pm \sqrt{K - (G4 - G2)^2} \quad \dots (3.10)$$

ただし、 $\epsilon$ : 格子間隔、 $K = 2 \times \left\{ \frac{\epsilon \times A(i, j)}{100} \right\}^2$ 。

そこで、4 隅の格子点の標高は、そのグリッドの傾斜と 3 隅の標高がわかれば残りの格子点の標高が求まることになる。すなわち、 $G1$  を既知とし、 $G2$  と  $G4$  について傾斜方向の条件から  $G2$  と  $G4$  の関係を求め、さらに与えられた平均傾斜  $\theta$  と分散  $\sigma_\theta^2$  の正規分布乱数から、そのグリッドの傾斜を発生させることにより  $G3$  が算定できる。

② 傾斜方向 (斜面方位) の条件設定

グリッドごとの傾斜方向がわかれば、対象地全体の概括の地形の型がわかる。言い換れば、対象地の地形の型がわかれば大まかな斜面方位が推測可能となる。

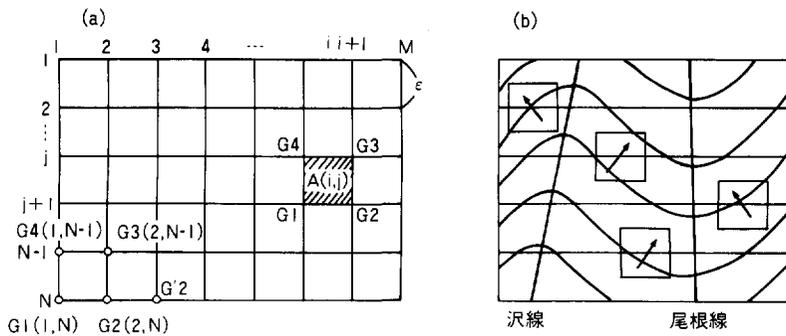


図 17. 地形モデルの算定

任意のグリッド  $(i, j)$  における斜面方位  $\varphi_{i,j}$  は式 (2.2) から  $\varphi_{i,j} = \tan^{-1}p(i,j) / q(i,j)$  で表される。いま与えられた対象地の地形図に対し、上方が下方より標高が高いという条件を与えると

$$q(i,j) = \frac{1}{2E} \{ (G3+G4) - (G1+G2) \} \geq 0 \dots\dots\dots(3.11)$$

となり、斜面方位角  $\varphi_{i,j}$  は  $p(i,j)$  について正か負の検討をすればよいことになる。

第 II 章の図 1 より、地形の型と傾斜方向について示したが、対象地の大まかな地形の型として沢や尾根の有無あるいは沢線や尾根線のおおよその位置を与えてやるとその部分を覆う格子網の各グリッドの傾斜方向の範囲を定めることができ、 $p(i,j)$  の符号判定から  $G1 \sim G4$  の高低条件が得られる。すなわち、沢線あるいは尾根線を境にその左右部分の領域では傾斜方向が異なり、傾斜方向はその線とその線を直交する角度域に対し、沢線では左右に開く方向となり、尾根線では左右から尾根線に向う方向に分布することになる (図 17 (b))。

任意の沢線または尾根線の方角  $\theta$  (北方位に対し  $-\frac{\pi}{4} < \theta < \frac{\pi}{4}$ ) に対して、 $q(i,j)$  が常に正の条件では、 $G1 \sim G4$  間に次の関係が成り立つ。

<沢の場合>

◦ 沢線の左側部分

$$\left. \begin{aligned} (G3 - G4) - (G1 - G2) < 0 \quad (p(i,j) < 0) \\ G4 > G2, \quad G3 > G1 \quad (\theta = \frac{\pi}{4} \text{ のとき, その他は不定}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.12)$$

◦ 沢線の右側部分

$$\left. \begin{aligned} (G3 - G4) - (G1 - G2) > 0 \quad (p(i,j) > 0) \\ G3 > G1, \quad G4 > G2 \quad (\theta = \frac{\pi}{4} \text{ のとき, その他は不定}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.13)$$

<尾根の場合>

◦ 尾根線の左側部分

$$\left. \begin{aligned} (G3 - G4) - (G1 - G2) > 0 \quad (p(i,j) > 0) \\ G3 > G1, \quad G4 > G2 \quad (\theta = \frac{\pi}{4} \text{ のとき, その他は不定}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.14)$$

◦ 尾根線の右側部分

$$\left. \begin{aligned} (G3 - G4) - (G1 - G2) < 0 \quad (p(i,j) < 0) \\ G4 > G2, \quad G3 > G1 \quad (\theta = \pi/4 \text{ のとき, その他は不定}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(3.15)$$

要するに、対象領域の各格子の位置が沢線や尾根線に対してどの部分に位置しているかがわかれば、それぞれ条件により  $G1 \sim G4$  間の関係がわかり、与えられた平均傾斜と分散および傾斜の分布から発生した乱数が、その条件を満たす範囲内でそのグリッドの傾斜を算出し  $G1 \sim G4$  を順次求めることができる。

以上のことから、地形傾斜モデル作成手順について述べる。

図 18 は、対象地を含む矩形領域について与えられた平均傾斜および分散に従う各グリッドの標高算定のフローチャートを示したものである。図 17 (a) より、 $(M, N)$  行列格子に対し、 $(1, N)$  の標高を既知として与え、沢および尾根の有無あるいはその位置と方向についてあらかじめ与えておく。最初に、既知標高の  $(1, N)$  に対し、 $N$  行の各格子点  $(2, N), (3, N) \dots\dots (M, N)$  について、傾斜方向の条件を満足する範囲で与えられた平均傾斜と分散の正規乱数から各格子の標高をあらかじめ算出し、これを基線とする。まず、 $N$  行 1 列の格子の 4 隅  $(1, N), (2, N), (2, N-1), (1, N-1)$  の標高を  $G1,$

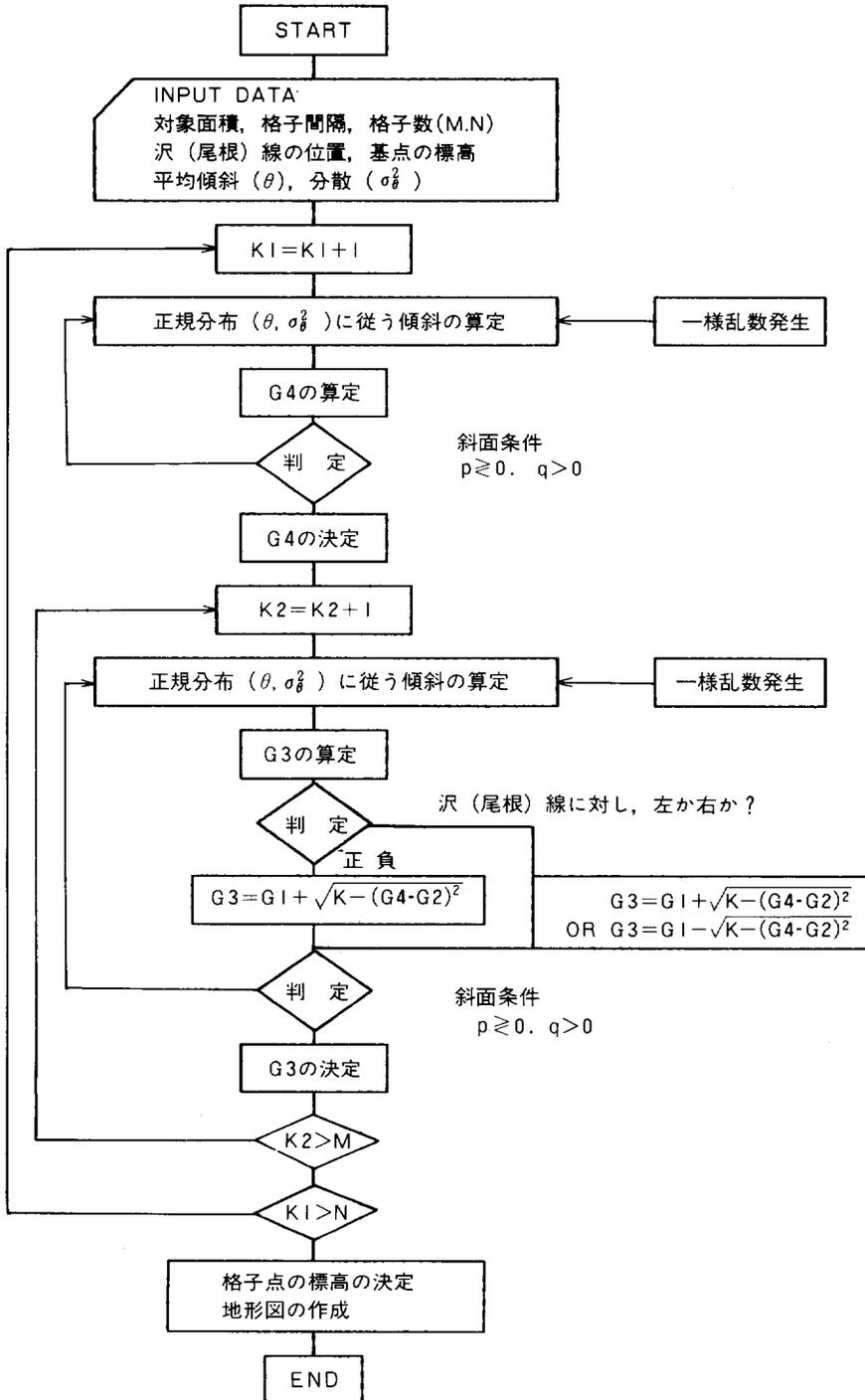


図 18. 地形図作成のフローチャート

$G_2, G_3, G_4$  とすると  $G_1, G_2$  は既知であり,  $G_4$  については次の条件を満足する範囲で与えられた平均傾斜と分散の正規乱数から任意の傾斜  $\theta_{(0,N)}$  を求め,  $G_4$  を算定する。

$$\sqrt{2(\varepsilon \tan \theta_{(0,N)})^2 - (G_4 - G_2)^2} \geq 0$$

傾斜方向の条件 ( $q > 0, p \geq 0, G_4 \geq G_2$ )

$$\therefore G_4 = G_2 + \sqrt{2} \varepsilon \tan \theta_{(0,N)} \dots\dots\dots(3.16)$$

$G_3$  については, このグリッドの傾斜  $\theta_{(1,N)}$  に関し, 同様に次の条件を満す傾斜  $\theta_{(1,N)}$  を求め  $G_3$  を決定する。

$$\sqrt{2(\varepsilon \tan \theta_{(1,N)})^2 - (G_4 - G'_2)^2} \geq 0$$

傾斜方向の条件 ( $q > 0, p \geq 0, G_3 \geq G'_2$ )

$$\therefore G_3 = G_1 \pm \sqrt{2(\varepsilon \tan \theta_{(1,N)})^2 - (G_4 - G_2)^2} \dots\dots\dots(3.17)$$

ただし,  $G'_2$  は次のグリッド (3,  $N$ ) の標高であり, 次に行う操作では  $G_2$  となる。

次のグリッド (2,  $N$ ), (3,  $N$ ), (3,  $N-1$ ), (2,  $N-1$ ) について同様に  $G_1 \sim G_4$  とおけば同様に (3,  $N-1$ ) の  $G_3$  が求まり,  $M$  列まで順次繰り返し実行することにより ( $N-1$ ) 行の標高が算出できる。以下同様にして ( $N-1$ ) 行を基線として ( $N-2$ ) 行の標高を求め, この操作を順次繰り返すことにより, 対象地の地形モデルを作成することができる。以上により得られた地形は, 与えられた平均傾斜と分散に従う地形傾斜となる。

(2) 地表状態の設定

各地表の土質や含水状態の違いとトラクタの走行やけん引を関係づけるものとして, 一般に走行抵抗係数や粘着係数あるいは摩擦係数等があるが, ここでは地表状態の設定に際し, 粘着係数の違いとして地表を設定した。粘着係数はトラクタけん引力とトラクタ駆動輪上の重量の比により表され, 同一の土質や含水状態でもトラクタの機種の違いによってその値は異なってくるが, 一般に, 地表が固く乾燥した状態ではその係数は大きく, 軟弱な地盤や泥濘化した場所ではその係数は小さい。

そこでトラクタが種々の地表状態に対して走行できる条件を登坂角との関連で検討した。

いま, 地形傾斜  $\theta$  (度) に対し, トラクタが走行 (空走) するのに必要なけん引力を  $T$  とすると,

$$T = W_t \sin \theta + \mu_1 W_t \cos \theta \dots\dots\dots(3.18)$$

となる。ただし,  $W_t$ : トラクタ重量,  $\mu_1$ : 走行抵抗係数。ここでトラクタが地形傾斜  $\theta$  に対して前進走行できるための条件は次のとおりである。

$$\mu_2 W_t \cos \theta - T \geq 0 \dots\dots\dots(3.19)$$

ただし,  $\mu_2$ : トラクタと地表面の摩擦 (駆動力) 係数。

また, 式 (3.19) は, 次式となる。

$$\mu_2 - \mu_1 \geq \tan \theta \dots\dots\dots(3.20)$$

ここで,  $\mu_2 - \mu_1 = \mu$  とおくと,  $\mu$  は粘着係数に相当することになり, トラクタが登坂可能な最大勾配を  $\alpha$  とすると, 次式が与えられる。

$$\mu = \tan \alpha \dots\dots\dots(3.21)$$

表 11. 地表状態の記述区分

最急登坂角 ( $\alpha$ )°	粘着係数 ( $\mu = \tan\alpha$ )	地 表 状 態
5	0.0875	泥濘化した地表
10	0.1763	腐植土(湿)
15	0.2679	砂質土や砂質粘土(湿)
20	0.3640	砂質粘土や腐植土(乾)
25	0.4663	粘土質(湿)
30	0.5774	粘土質(乾)
35	0.7002	作業道や幹線トラクタ道

表 12. 地表障害物の記述

地表障害物の記述	想定モデル条件
障害物密度	0~0.15 (0.0125 間隔 13 パターン)
障害物平均径(m)	0.5, 1.0, 1.5
障害物分布状態	ランダムパターン(初期値の異なる3パターン) (R値≒1.0)

すなわち、各地表状態の粘着係数に対し、トラクタの最急登坂角をパラメータとして与えれば、トラクタ走行に対する地表状態の関係が算定できる<sup>90)</sup>。また粘着係数と地表状態の関係については FAO 資料<sup>91)92)</sup>に示される関係があるが、ここではトラクタの走行装置の違いによる関係を考慮して、7段階の最急登坂角に対し、その粘着係数から表 11 のとおり地表状態を区分し設定した。

(3) 地表障害物の設定

主として天然林地を対象とする林地を想定し、林内の各種の地表障害物に対し、その形状は一定として大きさは平均径で与え、それぞれ平均径の異なる各種地表障害物を設定した。地表障害物の密度は第二章から、一応 1000 個/ha を基準として、障害物の出現頻度の最大を、0.15 (1500 個/ha) とし、0 から 0.15 の密度まで、それぞれ障害物密度の異なる林地を想定した。また地表障害物の分布状態はランダム分布を前提とし、第二章で述べた最近隣距離の分布を適用して、障害物密度ごとに、密度の増加とともにオーバーレイされるように障害物の位置を決定し、それぞれの障害物密度と大きさごとに障害物の位置図を作成し、表 12 に示す地表障害物に関する林地モデルを設定した。

2.3 電算解法の手順

トラクタの走行難易性に関する当該シミュレーションは、各種林地条件に対してトラクタが発発点から終点まで到達する距離の大小を評価の対象としており、対象領域に均一に分布した格子点から最短ルートの通過格子点を選定することが主題となっている。

図 19 は、シミュレーションのフローチャートを示したものである。また入力データとしての制約条件およびパラメータは表 13 のとおりである。

トラクタが走行可能か否かの判定は、次のような条件に対するものである。

- ① 始発点から格子点、格子点から他の格子点および終点と格子点の各探索操作に対し、それぞれの通過予定線のスタート点とエンド点の傾斜勾配は、与えられた制限勾配以内であること。またスタート点とエンド点間の通過点についても与えられた制限勾配の範囲にあること。(トラクタの登坂条件)。
- ② 同様に、各通過予定線に対して、進行方向に対する直交方向(トラクタの左右方向)の傾斜がスタート点、エンド点および通過点において転倒角以内であること。(転倒に対する安全条件)。
- ③ 各通過予定線に対して、スタート点とエンド点を結ぶ直線を中心に、トラクタ幅で囲まれた面積およびエンド点を中心にトラクタ幅を直径とする前進方向の半円の面積の中に地表障害物が含まれないこと。(障害物遭遇条件)。

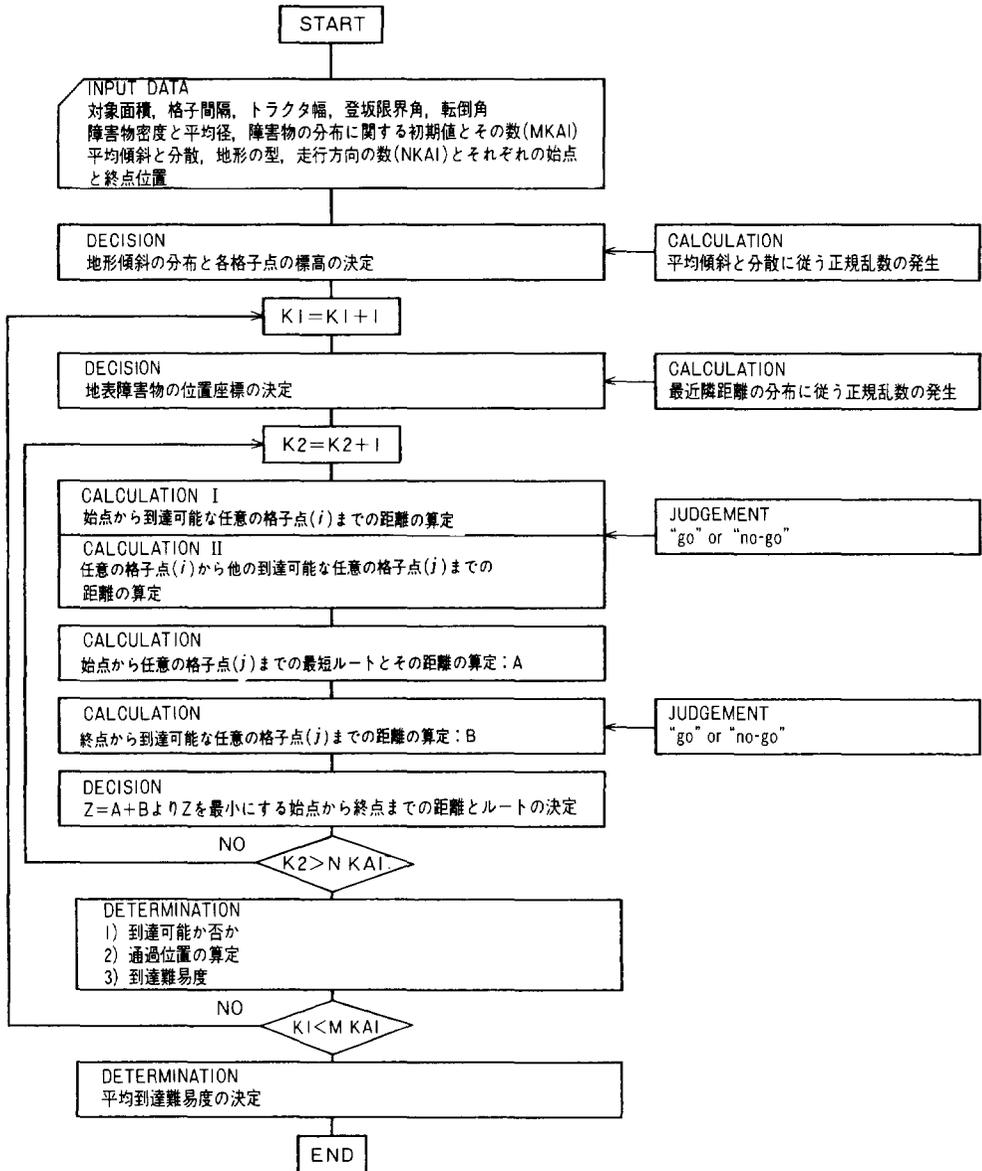


図 19. トラクタ走行難易度算定のプロチャート

④ トラクタの進行方向，すなわち方向転換角は集材けん引材長を考慮した角度内であること。(進行角条件)

なお，ここで用いたシミュレーション試験では対象面積 40 m × 40 m，格子間隔 2 m としたものであり，地形の型としては与えられた平均傾斜と分散に従う正規分布から求めた各傾斜を面域にランダムに分布させた場合を取り上げ実行したものである。また，④の進行角の条件は，進行方向に対し逆戻りしない条件，すなわち 90° 以下としたものである。

表 13. 本想定試験の入力データ

アイテ ム			カ テ ゴ リ ー
対象地	対象面積 格子間隔	( $\epsilon$ )	矩形 (40m×40m) 2 m
林地条件	地形傾斜	平均傾斜 ( $\theta$ ) 標準偏差 ( $\sigma$ ) 地形の型	0, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 25, 30, 35° 5°, 10° ランダム傾斜分布
	地表障害物	障害物密度 ( $\lambda$ ) 障害物平均径 ( $\bar{x}$ ) 障害物の分布状態	0~0.15 (0.0125 毎の 13パターン) 0.5 1.0 1.5 (m) ランダム分布 (R値≒1) 3パターン
	地表	地表の状態 (粘着係数) ( $\mu$ )	0.0875~0.7002 7パターン
トラクタ 関連	トラクタ車両幅 登坂限界角 転倒角	( $b$ ) ( $\alpha$ ) ( $\psi$ )	1.5 (m) 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35° 15°
走行方向	走行方向数 始点と終点の位置		対角方向 2 方向 直交方向 4 方向 (0, 0.40, 40), (40, 0.0, 40), (10, 0.10, 40) (30, 0.30, 40), (0, 10.40, 10), (0, 30.40, 30)

第 3 節 トラクタ走行難易度と林地条件

トラクタが林地を走行する際、その走行難易度は、地形傾斜が急になる程大きくなり、地表障害物の密度や大きさが増大する程大きくなる。さらに地表状態が軟弱化するに従ってその難易度は増大することが推察され、地形傾斜や障害物の密度・大きさあるいは地表状態がある限度に達するとトラクタの走行は不可能となる。これらの条件を有した林地ではトラクタによる集材作業は不適当なものとなる。また、これらの地形要素がある限度に達しなくても各地形要素の条件の組み合わせによって、トラクタの走行は不可能となる場合もあることが推察される。

図 20 は、おのおの障害物の平均径 0.5 m と 1.5 m について、1 例として“乾いた粘土質”に属する地表状態 (粘着係数  $\mu=0.577$ ) の場合のトラクタ走行難易度と林地条件の関係を示したものである。図から明らかなように、走行難易度は、地形傾斜が急勾配になるに従って大きくなり、また地表障害物の密度が高くなる程増大しており、それぞれ走行難易度は各地形要素の増加に対し、S 字型のロジスティック増加傾向を示している。

そこで、地形傾斜  $\theta$  と地表障害物密度  $\lambda$  に対する走行難易度を  $\eta$  とおくと、次のような展開が推察できる。

いま、 $\eta = f(\theta, \lambda)$  とおくと、

$$d\eta = \frac{\partial \eta}{\partial \theta} \cdot d\theta + \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} \cdot d\lambda \dots\dots\dots(3.22)$$

となる。ここで走行難易度  $\eta$  の増加傾向は  $\theta$  および  $\lambda$  に対し、それぞれロジスティック方程式とすると、次式で表される。

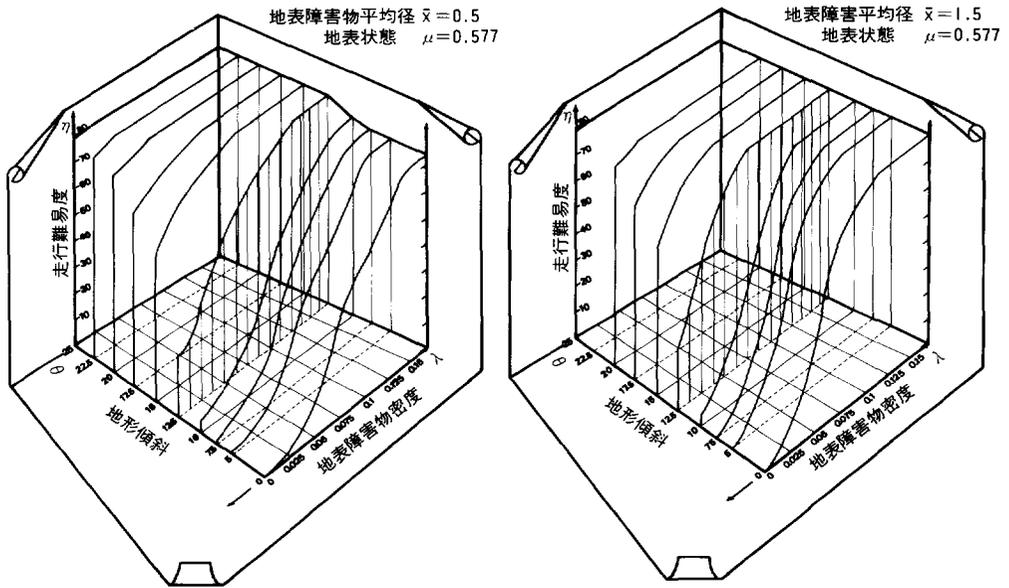


図 20. 林地条件と走行難易度の関係

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} = a_1 - b_1 \eta \quad \dots\dots\dots(3.23)$$

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} = a_2 - b_2 \eta \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

$$K = \frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

ただし、 $K: \eta$  の極値 (最大値)。(式 (3.7) から対角線方向の走行 (2 方向) および直交方向の走行 (4 方向) の 6 走行方向の平均として、最大値  $K$  は、ここでは 80.467% となる)。 $a_1, b_1, a_2, b_2$ : それぞれ  $\eta$  の増加率に対する係数。

そこで式 (3.22) に式 (3.23), 式 (3.24) および式 (3.25) を代入すると次式を得る。

$$d\eta = b_1 \eta (K - \eta) \cdot d\theta + b_2 \eta (K - \eta) \cdot d\lambda$$

$$\frac{d\eta}{\eta(K - \eta)} = b_1 \cdot d\theta + b_2 \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots(3.26)$$

式 (3.26) は偏微分方程式となり、積分すると次式を得る。

$$\ln|\eta| - \ln|K - \eta| = b_1 \theta + b_2 \lambda + C \quad \dots\dots\dots(3.27)$$

ここで、任意の積分定数  $C$  を、初期値  $\eta(0) = \eta_0$  を解き  $C$  を消去すると

$$\ln|\eta| - \ln|K - \eta| = b_1 \theta + b_2 \lambda + \ln|\eta_0| - \ln|K - \eta_0| \quad \dots\dots\dots(3.28)$$

となる。 $\eta$  および  $\eta_0$  は正であり、 $(K - \eta)$  と  $(K - \eta_0)$  は同符号であり、 $\frac{K - \eta_0}{K - \eta}$  は常に正であるから、式 (3.28) を指数変換すると

$$\frac{\eta}{\eta_0} \left( \frac{K - \eta_0}{K - \eta} \right) = e^{b_1 \theta + b_2 \lambda} \quad \dots\dots\dots(3.29)$$

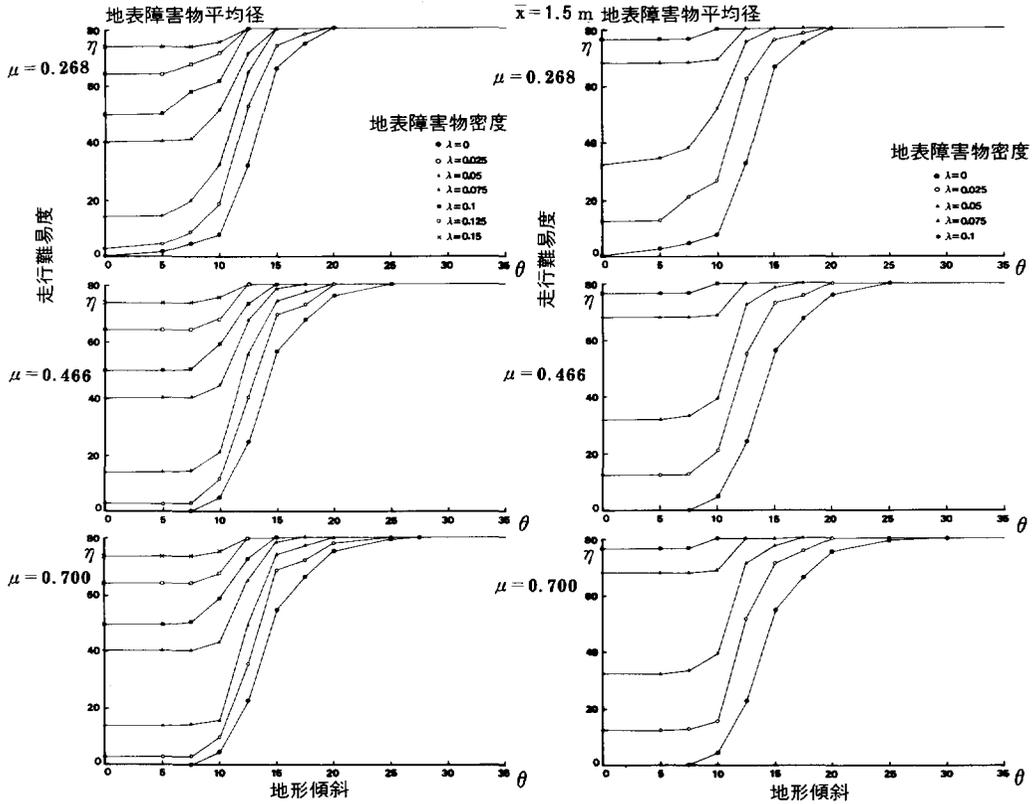


図 21. 地表状態ごとの走行難易度と地形傾斜の関係

となり、 $\eta$  について解くと、次式 (3.30) が得られる。

$$\eta = \frac{K}{1 + \left(\frac{K - \eta_0}{\eta_0}\right) e^{-(b_1\theta + b_2\lambda)}} \dots\dots\dots(3.30)$$

すなわち、障害物の平均径を一定とした場合、トラクタ走行難易度  $\eta$  は、式 (3.30) で与えられ、 $\eta_0$  は地表状態によって変るパラメータであるから、それぞれ地形傾斜、障害物密度および地表状態の各地形要素を含む関係式で表されることになる。

以下試験の結果から、走行難易度と林地条件の関係について検討を行った。

図 21 は、地表状態の異なる場合 (粘着係数  $\mu$  が、0.268, 0.466 および 0.700 の場合) について走行難易度  $\eta$  と地形傾斜  $\theta$  の関係を示したものである。図はそれぞれ障害物平均径  $\bar{x}$  が 0.5 m および 1.5 m の場合のものであるが、図から明らかのように、走行難易度は、地形傾斜が急勾配になるに従って増大しており、その増加傾向は傾斜が小さいときはほとんど変化が少なく、 $10^\circ$  以上になると増加率は急増する。さらに傾斜が大きくなると増加率は小さくなる所謂 S 字型の曲線増加の傾向を示している。これらの関係は地表障害物の密度や平均径および地表状態の異なる場合についても同様の傾向が認められた。

そこでこれらの関係について図 22～図 26 に示す結果から、走行難易度と林地条件の関係式を算定すると次式のとおりである。(附録参照)

$$\left. \begin{aligned} \theta < 5^\circ \quad \eta &= \frac{K}{1 + 41.7709 e^{-21.5047 \lambda \omega}} \\ 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \quad \eta &= \frac{K}{1 + 41.7709 e^{-(C + 21.5047 \lambda \omega)}} \\ \theta \geq 10^\circ \quad \eta &= \frac{K}{1 + 1581.4530 e^{-118.3891 \lambda \omega + 27.9131(\tan \theta + A)}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.31)$$

ただし、 $\eta$ ：走行難易度（%）、 $\theta$ ：地形傾斜（度）、 $\lambda$ ：地表障害物密度、 $\omega = b + \bar{X}$ （ $b$ ：トラクタ幅（m）、 $\bar{X}$ ：障害物平均径（m））、 $\mu$ ：地表状態（粘着係数）、 $K = 80.467$ （定数）、 $A = 0.3039 e^{-9.2416 \mu}$ 、 $C = (14.4955 + 314.3367 A - 35.0856 \lambda \omega) (\tan \theta - 0.0875)$ 。

以上のように、各林地条件に対する走行難易度は、地形傾斜の範囲により、それぞれ上式（3.31）で表され、各式に林地条件を代入することにより走行難易度を求めることができる。

第4節 トラクタ地形区分法

4.1 トラクタ集材地形の分類

地表面において作業を行うトラクタ集材にとっては、林地の地表面に対し、高さの次元、横への広がり次元および地表面下の次元に関する因子が、その作業に対して何らかの影響を与えることになり、これらの次元の因子の良否あるいはその組み合わせの仕方が集材作業の難易性を左右することになる。ここでは、これらの次元に関する記述因子として地形傾斜、地表障害物および地表状態を取り上げ、トラクタ走行難易度との関係から地形分類について検討した。

前節において、トラクタの走行難易度は、地形傾斜が急になる程大きく、地表障害物密度および平均径が大きくなる程増大すること、地表状態が軟弱な程、走行難易度は大きいこと、また走行難易度は、地形傾斜や障害物密度の増大に対してS字型増加傾向を示し、各地形要素の値がある限度以上になると走行難易度は極値に至り、トラクタの走行は全く不可能となることなどが明らかにされ、走行難易度は各地形要素に対し、式（3.31）の関係が示された。

図27は、それぞれの地表状態（ $\mu = 0.2$ 、および  $\mu = 0.6$ ）について、式（3.31）の関係を示したものである。

図は、縦軸に障害物遭遇因子（ $\lambda \omega$ ）、横軸に地形傾斜（ $\tan \theta$ ）をとり、走行難易度（ $\eta$ ）との関係を示したものであるが、図からも明らかなように、走行難易度は、障害物密度や平均径の増大とともに大きくなり、また地形傾斜  $5^\circ$ （8.75%）以上では傾斜の増大とともに、

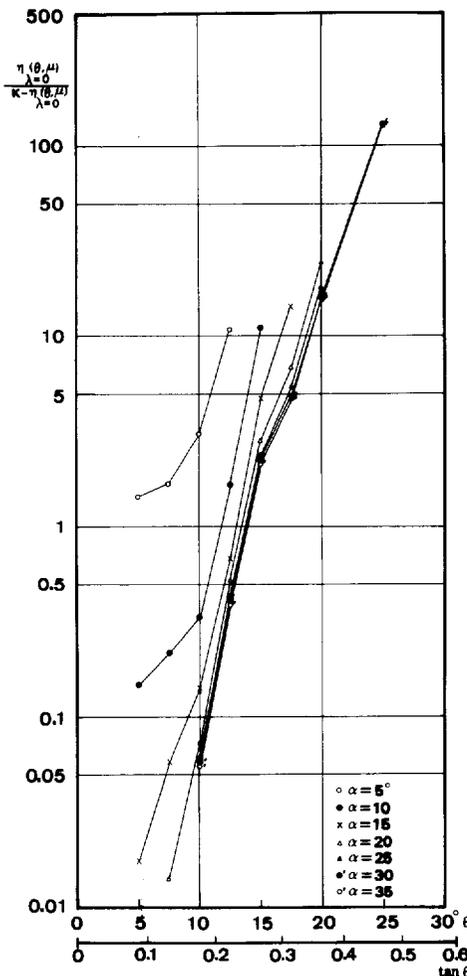


図 22. 地表障害物密度（ $\lambda$ ）=0 の場合の走行難易度と地形傾斜および地表状態の関係

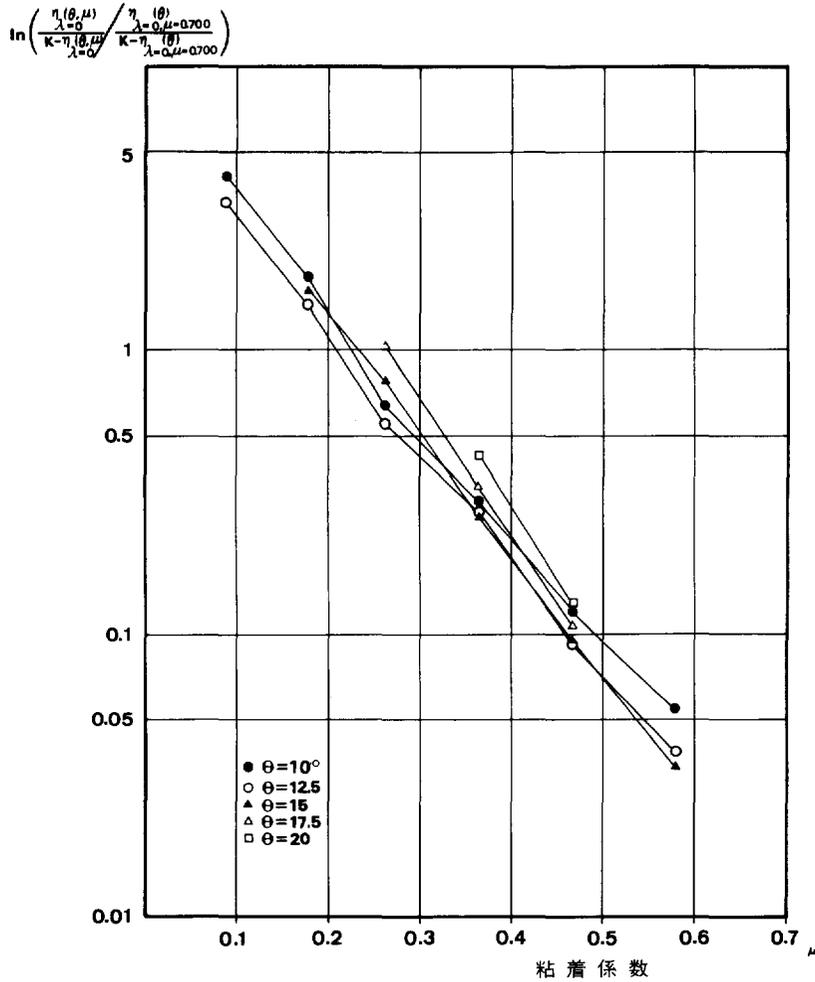


図 23.  $\ln \left( \frac{\eta(\theta, \mu)}{K - \eta(\theta, \mu)} \right) / \frac{\eta(\theta)}{K - \eta(\theta)}$  と粘着係数 ( $\mu$ ) の関係

表 14. トラクタ集材地形の地形区分

指標 $\eta$ (%)	~10	10~30	30~50	50~70	70~80	80 以上
トラクタ集材作業 の難易	極めて容易	容易	中程度	困難	極めて困難	トラクタ作業 不能
地形の種類	I 極良	II 良	III 中	IV 悪	V 極悪	VI 架線地形

大きくなることわかる。さらにこれらの関係は、地表状態の違いによって異なり、地表状態を表す粘着係数  $\mu$  の値が小さい程同一の  $\lambda\omega$  および  $\tan\theta$  に対し、走行難易度は大きい値となることわかる。

そこで、この走行難易度  $\eta$  の値を指標として表 14 に示すようなトラクタ地形の区分を行った。表は、

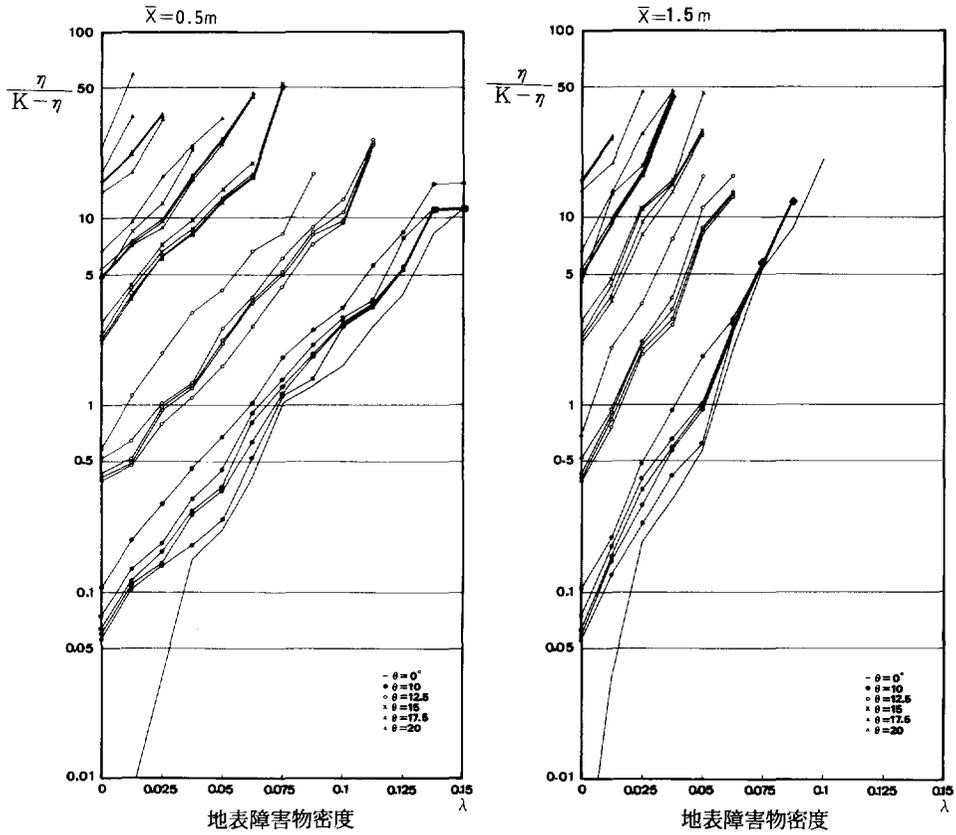


図 24. 地表障害物密度と走行難易度の関係

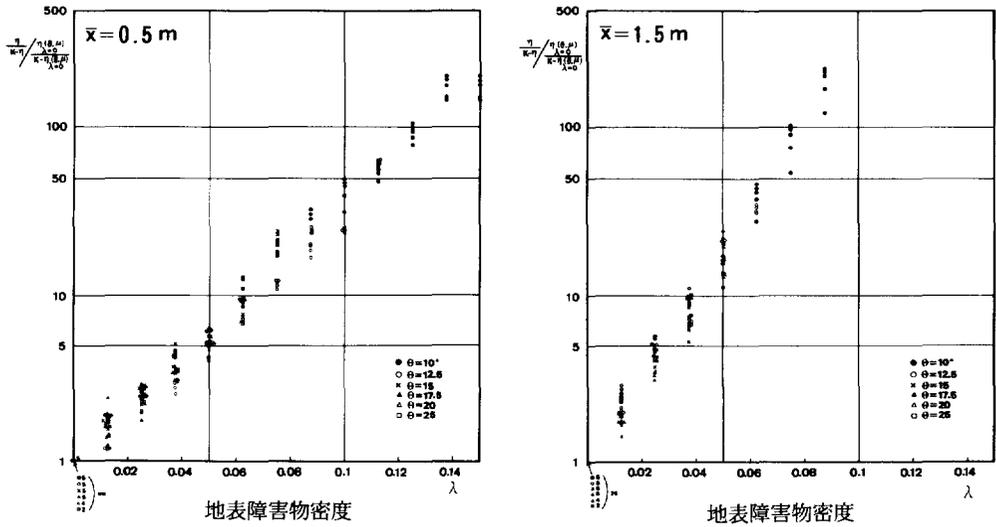


図 25.  $\left( \frac{\eta}{K-\eta} / \frac{\eta(\theta, \mu)}{K-\eta(\theta, \mu)} \right)$  と地表障害物密度の関係

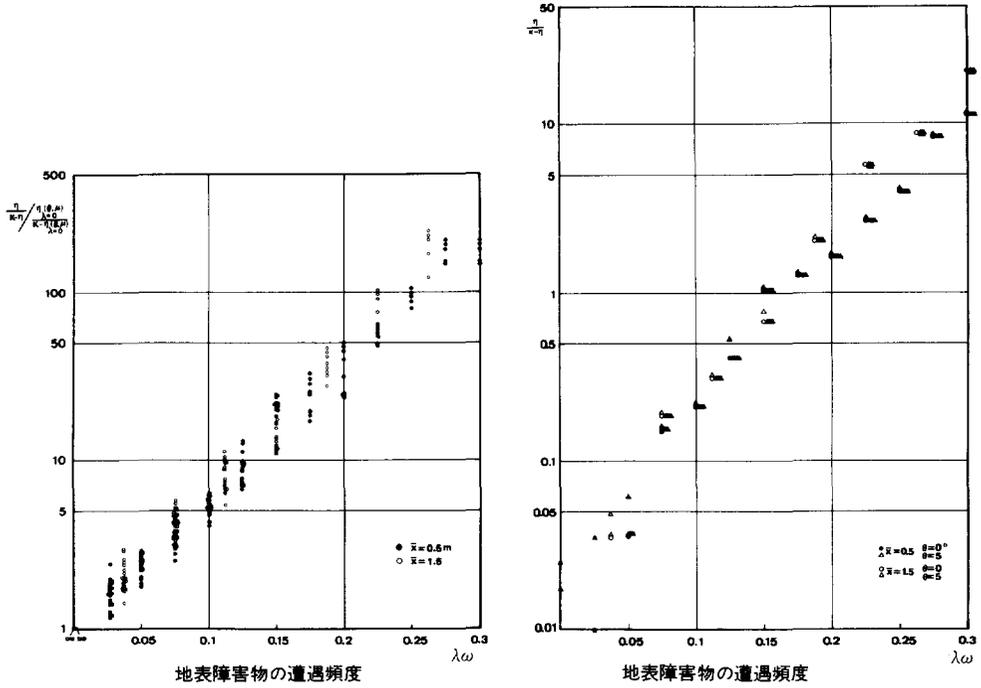


図 26. 地表障害物の遭遇頻度 ( $\lambda\omega$ ) と走行難易度 (左図:  $\theta \geq 10^\circ$ , 右図:  $\theta \geq 5^\circ$ )

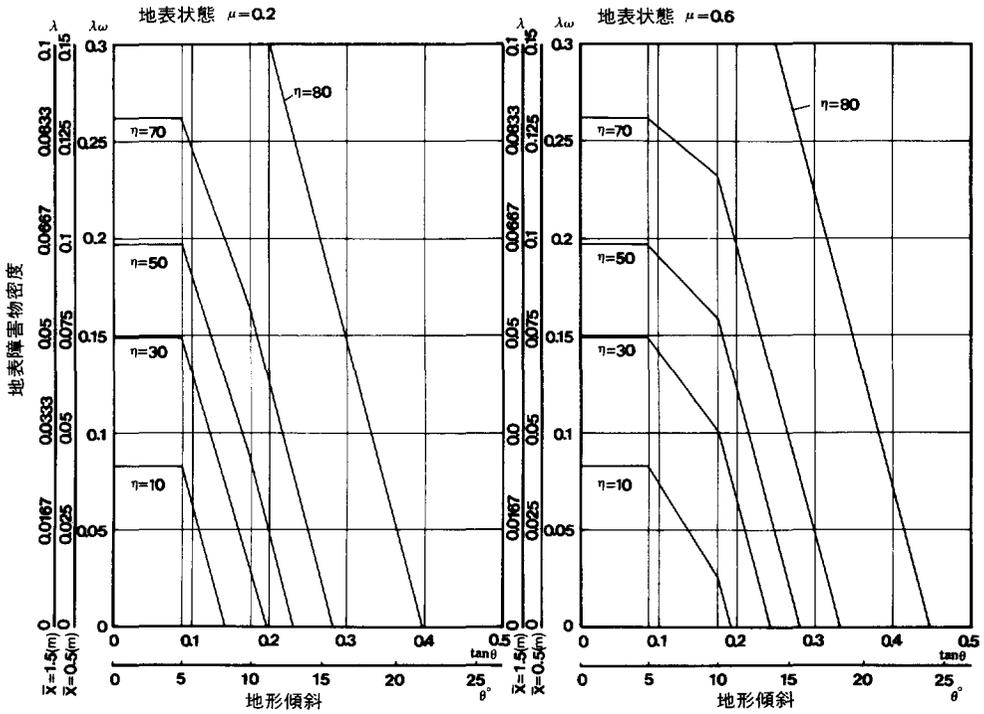


図 27. トラクタ走行難易度による林地条件の区分

表 15. トラクタ集材地形の地形記述

(地形傾斜分類)					
地形傾斜 tan θ (%)	~10	10~20	20~33	33~50	50 以上
地形傾斜の種類	平坦地	緩斜地	中斜地	急斜地	急峻地
(地表状態分類)					
地表状態 μ	~0.2	0.3	0.4	0.5	0.6~
地表状態の種類	腐植土 (湿)	砂質粘土 (湿)	砂質粘土 (乾)	粘土質 (湿)	粘土質 (乾)
(地表障害物密度分類)					
障害物密度 λ	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125
平均間隔 $\bar{r}$ (m)	3.1622	2.2361	1.8257	1.5811	1.4142
(地表障害物平均径分類)					
障害物平均径 $\bar{x}$ (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	
障害物種類	立木・伐根	転石・土塊	枝条・倒木	伐跡地 微地形	

表 16. 地形記述区

$\bar{x}$ (m)	μ tan θ (%) λ	0.2						
		(~10) 10	(10~20) 15	(20~30) 26.5	(33~50) 41.5	(50~) 50	(~10) 10	(10~20) 15
0.5	0.025	5.278	22.933	73.071	80.343	—	5.278	12.292
	0.050	13.723	41.155	77.289	—	—	13.723	25.854
	0.075	30.257	59.007	79.214	—	—	30.257	44.597
	0.100	51.376	70.680	79.961	—	—	51.376	61.602
	0.125	67.437	76.437	80.213	—	—	67.437	72.064
1.0	0.025	6.766	27.089	74.461	80.369	—	6.766	15.020
	0.050	20.950	50.628	78.481	—	—	20.950	34.933
	0.075	46.223	68.408	79.836	—	—	46.223	57.896
	0.100	67.437	76.437	80.213	—	—	67.437	72.064
	0.125	76.607	79.218	—	—	—	76.607	77.755
1.5	0.025	8.628	31.581	75.567	80.389	—	8.628	18.191
	0.050	30.257	59.007	79.214	—	—	30.257	44.597
	0.075	60.467	74.133	80.087	—	—	60.467	67.678
	0.100	75.490	78.883	80.385	—	—	75.490	77.046
	0.125	79.423	80.089	—	—	—	79.423	79.636
2.0	0.025	10.931	36.313	76.591	—	—	10.931	21.813
	0.050	40.859	65.719	79.711	—	—	40.859	53.777
	0.075	70.113	77.267	80.340	—	—	70.113	73.715
	0.100	78.697	79.857	—	—	—	78.697	79.129
	0.125	80.192	80.354	—	—	—	80.192	80.217

トラクタ幅 b : 1.5m  
—は 80.4 以上 (極値)

トラクタが林地を走行する際、走行が全く不可能となる  $\eta$  の値、すなわち  $K$  (80.467) に対してそれぞれその値のほぼ 12.5%, 37.5%, 62.5%, 87.5% 及び 100% に当たる  $\eta$  の値により 5 段階の区分を与えたものであり、 $\eta$  の値が 100% 以上ではトラクタの走行は不可能となり、トラクタ以外、すなわち架線適用地形として示している。要するに、 $\eta$  の値によりトラクタ地形に対し、(I) 極良地形、(II) 良地形、(III) 中地形、(IV) 悪地形、(V) 極悪地形および (VI) 架線適用地形の 6 区分が与えられる。

表 15 は、それぞれの地形要素を前節までに述べた諸関係から分類したものである。これらの各地形要素の記述区分に対して走行難易度を算定すると、表 16 のとおりである。またこれらの記述区分に対し、地形区分すると表 17 のとおりである。表 16 および表 17 から明らかなように、傾斜区分が急峻の場合 (傾斜 50% 以上) では、トラクタの走行はほとんど不可能となり、急斜地 (33~50%) の場合でもトラクタの走行はきわめて困難ないし不可能となる。また地表障害物についてみると障害物密度が 0.1 以上では、トラクタの走行はきわめて困難ないし不可能となる場合が多いが、地形が平坦~緩斜地の場合や地表状態が良好の場合あるいは障害物平均径が小さい場合では (IV) の困難の区分以下となる。

これらの表から、トラクタの走行が一応妥当と判定される地形として“きわめて困難”および“不可能”の第 V と第 VI の区分の地形を除いた地形を考えると、トラクタの走行にとってそれぞれの地形要素に対する目安として、地形傾斜は 26.5% 以下、地表障害物密度は 0.1 (1000 個/ha) 以下、地表状態について

分 と 走 行 難 易 度

0.4			0.6				
(20~33) 26.5	(33~50) 41.5	(50~) 50	(~10) 10	(10~20) 15	(20~33) 26.5	(33~50) 41.5	(50~) 50
61.279	80.086	—	5.278	11.057	58.597	79.961	—
71.530	80.315	—	13.723	23.732	70.053	80.285	—
76.591	—	—	30.257	42.124	75.905	80.394	—
78.846	—	—	51.376	59.757	78.602	—	—
79.836	—	—	67.437	71.086	79.714	—	—
64.380	80.164	—	6.766	13.567	62.026	80.105	—
74.571	80.371	—	20.950	32.510	73.493	80.352	—
78.481	—	—	46.223	55.834	78.120	—	—
79.836	—	—	67.437	71.086	79.714	—	—
80.265	—	—	76.607	77.412	80.227	—	—
67.186	80.226	—	8.628	16.508	65.122	80.179	—
76.591	—	—	30.257	42.124	75.905	80.394	—
79.462	—	—	60.467	66.291	79.338	—	—
80.214	—	—	75.490	76.617	80.165	—	—
—	—	—	79.423	79.528	80.391	—	—
69.479	80.275	—	10.931	19.902	67.722	80.238	—
78.011	—	—	40.859	51.526	77.525	—	—
79.961	—	—	70.113	72.909	79.897	—	—
80.366	—	—	78.697	78.957	80.346	—	—
—	—	—	80.192	80.184	—	—	—

表17. 走行難易度によるトラクタ地形区分

$\bar{x}$ (m)	$\lambda$	$\mu$ $\tan\theta$ (%)	0.2					0.4					0.6				
			~10	15	26.5	41.5	50~	~10	15	26.5	41.5	50~	~10	15	26.5	41.5	50~
0.5		0.025	I	II	V	V	VI	I	II	IV	V	VI	I	II	IV	V	VI
		0.050	II	III	V	VI	VI	II	II	V	V	VI	II	II	V	V	VI
		0.075	III	IV	V	VI	VI	III	III	V	VI	VI	III	III	V	V	VI
		0.100	IV	V	V	VI	VI	IV	IV	V	VI	VI	IV	IV	V	VI	VI
		0.125	IV	V	V	VI	VI	IV	V	V	VI	VI	IV	V	V	VI	VI
1.0		0.025	I	II	V	V	VI	I	II	IV	V	VI	I	II	IV	V	VI
		0.050	II	IV	V	VI	VI	II	III	V	V	VI	II	III	V	V	VI
		0.075	III	IV	V	VI	VI	III	IV	V	VI	VI	III	IV	V	VI	VI
		0.100	IV	V	V	VI	VI	IV	V	V	VI	VI	IV	V	V	VI	VI
		0.125	V	V	VI	VI	VI	V	V	V	VI	VI	V	V	V	VI	VI
1.5		0.025	I	III	V	V	VI	I	II	IV	V	VI	I	II	IV	V	VI
		0.050	III	IV	V	VI	VI	III	III	V	VI	VI	III	III	V	V	VI
		0.075	IV	V	V	VI	VI	IV	IV	V	VI	VI	IV	IV	V	VI	VI
		0.100	V	V	V	VI	VI	V	V	V	VI	VI	V	V	V	VI	VI
		0.125	V	V	VI	VI	VI	V	V	VI	VI	VI	V	V	V	VI	VI
2.0		0.025	II	III	V	VI	VI	II	II	IV	V	VI	II	II	IV	V	VI
		0.050	III	IV	V	VI	VI	III	IV	V	VI	VI	III	IV	V	VI	VI
		0.075	V	V	V	VI	VI	V	V	V	VI	VI	V	V	V	VI	VI
		0.100	V	V	VI	VI	VI	V	V	V	VI	VI	V	V	V	VI	VI
		0.125	V	V	VI	VI	VI	V	V	VI	VI	VI	V	V	VI	VI	VI

ただしVIは80.4以上

は粘着係数が0.4以上となる。

#### 4.2 現地への適用とトラクタ地形指数

トラクタ地形の地形区分は、与えられた林地の各地形要素を、それぞれ式(3.31)に代入して $\eta$ の値を算定することにより、 $\eta$ の値から分類は可能となるが、現地への適用を考慮すると、さらに簡易な指標が要求される。そこで得られた各式を用いてトラクタ地形分類のための指標(トラクタ地形指数と呼称する)について検討した。

トラクタの走行難易度に関する、それぞれの地形要素を二つの指数に分け、それぞれ地表障害物に関する指数( $I_r$ )および地形傾斜と地表状態に関する指数( $I_i$ )とし、 $I_r$ および $I_i$ を%で表わし、次のようにおくと、式(3.31)の $\theta \geq 10^\circ$ の場合は、近似的に式(3.34)となる。

$$I_r(\%) = \lambda \omega \times 100 \quad \dots\dots\dots(3.32)$$

$$I_i(\%) = (\tan\theta + 0.3039e^{-9.2416\mu}) \times 100 \quad \dots\dots\dots(3.33)$$

$$\ln 1581.4530 \frac{\eta}{K - \eta} / 0.1839 \cong I_r + 1.5I_i \quad \dots\dots\dots(3.34)$$

そこで、式(3.34)の左辺を $I$ とおき、 $\eta$ と $I$ の関係をみると図28のとおりになり、 $I$ は次に示す $\eta$ の範囲で直線に近似できる。すなわち、 $\eta < 10$ を無視すると、  
の範囲で直線に近似できる。すなわち、 $\eta < 10$ を無視すると、

$$\eta \leq 70 \quad (I \leq 50)$$

$$I = \frac{1}{3}(\eta + 80) \quad \dots\dots\dots(3.35)$$

$$70 < \eta \leq 80 \quad (50 < I \leq 67)$$

$$I = \frac{5}{3}(\eta - 40) \quad \dots\dots\dots(3.36)$$

となる。ここで  $\eta$  の最大値  $K \doteq 80$  とし、 $\eta$  を  $\Delta$  とおき、 $\Delta$  をトラクタ地形指数とすると、 $I \doteq I_r + 1.5I_i$  より、 $\Delta$  は近似的に次式となる。

$$I \leq 50$$

$$\Delta = 3(I_r + 1.5I_i) - K \quad \dots\dots\dots(3.37)$$

$$I > 50$$

$$\Delta = \frac{3}{5}(I_r + 1.5I_i) + \frac{K}{2} \quad \dots\dots\dots(3.38)$$

また式 (3.33) から、 $0.3039e^{-9.2416\mu}$  を  $I_\mu$  とおくと  $I_\mu$  と  $\mu$  は図 29 のとおりであるが、テイラー展開すると  $I_\mu$  は近似的に、次式 (3.39) で表されることから、式 (3.33) は式 (3.40) となる。

$$I_\mu = 0.3039e^{-9.2416\mu} \\ \doteq 0.3 / \left(1 + 9\mu + \frac{(9\mu)^2}{2}\right) = \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{1 + (1 + 9\mu)^2} \quad \dots\dots\dots(3.39)$$

$$\therefore I_i = \left(\tan\theta + \frac{3}{5} \cdot \frac{1}{1 + (1 + 9\mu)^2}\right) \times 100 = (\tan\theta + I_\mu) \times 100 \quad \dots\dots\dots(3.40)$$

同様にして、地形傾斜が  $10^\circ$  以下についてみると、式 (3.31) から地形傾斜  $5^\circ$  以下では、 $\eta$  の値は、地表障害物因子 ( $\lambda\omega$ )、すなわち  $I_r$  にのみ関係しており、 $I_r$  と  $\eta$  の関係は、図 28 に示すとおりである。図から、 $I_r$  は  $\eta$  の増大に対して、 $\theta > 10^\circ$  の場合の  $I$  の値とほぼ同じ増加傾向を示しており、それぞれの  $\eta$  の範囲に対し、 $I$  から一定の値を減じたものとして近似することができる。そこで、 $I_r = I - 22.5$  として、式 (3.35) および式 (3.36) に代入すると、 $\theta \leq 5^\circ$  の場合のトラクタ地形指数  $\Delta$  が求められる。

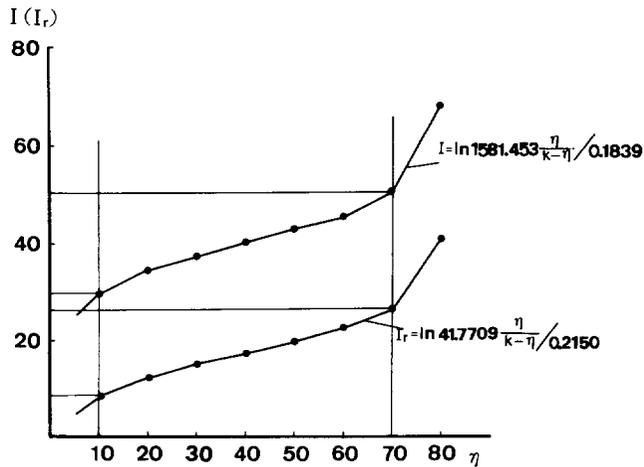


図 28.  $I$  (または  $I_r$ ) と  $\eta$  の関係

表 18. トラクタ集材地

調 査 地		地 形 傾 斜	地 表 障 害 物		地 表 状 態		I <sub>r</sub>	I <sub>i</sub>
			λ	$\bar{x}$	μ	Iμ		
天然林択伐地	1	15.8	0.1031	0.44	0.5	0.0192	20.00	17.72
	2	6.5	0.1027	0.37	"	"	19.20	8.42
	3	8.1	0.1056	0.61	"	"	22.28	10.02
	4	8.6	0.0883	1.02	"	"	22.25	10.52
	5	17.1	0.1140	0.57	0.55	0.0165	23.60	18.75
	6	13.0	0.1064	1.23	"	"	29.05	14.65
	7	16.4	0.1369	0.52	"	"	27.65	18.05
天然林漸伐地		28.0	0.0719	0.45	0.55	0.0165	14.02	29.65
人工林	皆伐地	26.7	0.1525	0.19	0.4	0.0271	25.77	29.41
	間伐地	9.6	0.0625	0.21	0.45	0.0226	10.69	11.86
	伐跡地	8.5	0.0481	0.32	0.6	0.0143	8.75	9.93

注)

$$\eta = \frac{K}{1 + 41.7709e^{-21.5047\lambda\omega}}$$

$$\eta = \frac{K}{1 + 41.7709e^{-(C+21.5047\lambda\omega)}}$$

$$\eta = \frac{K}{1 + 1581.4530e^{-118.3891\lambda\omega + 27.9131(\tan\theta + A)}}$$

(A = 0.3039e<sup>-9.2516</sup>μ, C = (14.4955 + 314.3367A - 35.0856λω)(tanθ - 0.0875), K = 80.467)

I) I ≤ 50

$$\theta \leq 5^\circ (I_i < 8.75) \quad d = 3(I_r + 22.5) - K \quad (1)$$

$$5^\circ < \theta < 10^\circ (8.75 < I_i < 17.63) \quad d = 3(I_r + 0.45 I_i) - K/3 \quad (2)$$

$$\theta \geq 10^\circ (I_i > 17.63) \quad d = 3(I_r + 1.5 I_i) - K \quad (3)$$

II) I > 50

$$\theta \leq 5^\circ (I_i < 8.75) \quad d = 3/5 \times (I_r + 22.5) + K/2 \quad (4)$$

$$5^\circ < \theta < 10^\circ (8.75 < I_i < 17.63) \quad d = 3/5 \times (I_r + 0.45 I_i) + 2/3 \times K \quad (5)$$

$$\theta \geq 10^\circ (I_i > 17.63) \quad d = 3/5 \times (I_r + 1.5 I_i) + K/2 \quad (6)$$

(K = 80, I<sub>r</sub><sup>(%)</sup> = λω × 100, I<sub>i</sub><sup>(%)</sup> = (tanθ + 3/5 × 1/(1 + (1 + 9μ)<sup>2</sup>)) × 100, ω = b + x,

トラクタ幅 (b) = 1.5m, I = I<sub>r</sub> + 1.5 I<sub>i</sub>, ( ) の数字は使用した式)

$$\eta \leq 70 \quad (I \leq 50)$$

$$I_r = \frac{1}{3}(\eta + 80) - 22.5$$

$$d = 3(I_r + 22.5) - K \quad \dots\dots\dots(3.41)$$

$$\eta > 70 \quad (I > 50)$$

$$I_r = \frac{5}{3}(\eta - 40) - 22.5$$

$$d = \frac{3}{5}(I_r + 22.5) + \frac{K}{2} \quad \dots\dots\dots(3.42)$$

また 5° ≤ θ < 10° の範囲における η の値は, θ ≤ 5° の η の値と θ ≥ 10° の η の値を結ぶ線分上の

形の地形指数と現地適用

I	地形指標		地形 クラス	摘 要
	$\Delta$	$\eta$		
46.58	59.74 (3)	61.297 (2)	IV	東大北海道演習林
31.83	45.10 (1)	48.111 (1)	III	
37.31	54.34 (1)	59.747 (1)	IV	
38.03	54.25 (1)	59.648 (1)	IV	
51.73	71.04 (6)	70.127 (2)	V	
51.03	74.72 (5)	75.515 (2)	V	
54.73	72.84 (6)	75.050 (2)	V	
58.50	75.10 (6)	76.943 (3)	V	伊那営林署内
69.89	81.93 (6)	79.954 (3)	VI	沼田営林署管内
28.48	21.41 (2)	16.847 (2)	II	草津営林署管内
23.65	13.93 (1)	10.931 (1)	II	岩村田営林署管内

値となる。式 (3.40) から、 $\mu$  のとりうる値に対する  $\left(\frac{3}{5} \cdot \frac{1}{1+(1+9\mu)^2}\right)$  の値は  $\tan \theta$  に比べきわめて小さいことから、 $I_i = \tan 5^\circ \times 100$ 、および  $I_i = \tan 10^\circ \times 100$  として、 $\theta \leq 5^\circ$  の場合の  $\Delta$  と  $\theta \geq 10^\circ$  の場合の  $\Delta$  から  $5^\circ \leq \theta < 10^\circ$  における  $\Delta$  を求めると次式のとおりである。

$$\eta \leq 70 \quad (I \leq 50)$$

$$\Delta - \{3(I_r + 22.5) - K\} = \frac{\{3(I_r + 1.5 \times 100 \tan 10^\circ - K) - \{3(I_r + 22.5) - K\}\}}{100(\tan 10^\circ - \tan 5^\circ)} (I_i - 100 \tan 5^\circ)$$

$$\therefore \Delta = 3(I_r + 0.3 \times 1.5 I_i) - \frac{1}{3} K \quad \dots\dots\dots(3.43)$$

$$\eta > 70 \quad (I > 50)$$

$$\Delta - \left\{ \frac{3}{5}(I_r + 22.5) + \frac{K}{2} \right\} = \frac{\left\{ \frac{3}{5}(I_r + 1.5 \times 100 \tan 10^\circ) + \frac{K}{2} - \left\{ \frac{3}{5}(I_r + 22.5) + \frac{K}{2} \right\} \right\}}{100(\tan 10^\circ - \tan 5^\circ)} (I_i - 100 \tan 5^\circ)$$

$$\therefore \Delta = \frac{3}{5}(I_r + 0.3 \times 1.5 I_i) + \frac{2}{3} K \quad \dots\dots\dots(3.44)$$

以上、これらのトラクタ地形の地形指数について、とりまとめると次のとおりである。

I)  $I \leq 50$

$$\left. \begin{array}{ll} \theta \leq 5^\circ & (I_i \leq 8.75) & \Delta = 3(I_r + 22.5) - K \\ 5^\circ < \theta \leq 10^\circ & (8.75 < I_i \leq 17.63) & \Delta = 3(I_r + 0.45 I_i) - \frac{K}{3} \\ \theta > 10^\circ & (I_i > 17.63) & \Delta = 3(I_r + 1.5 I_i) - K \end{array} \right\}$$

II)  $I > 50$

$$\left. \begin{array}{ll} \theta \leq 5^\circ & (I_i \leq 8.75) & \Delta = \frac{3}{5}(I_r + 22.5) + \frac{K}{2} \\ 5^\circ < \theta \leq 10^\circ & (8.75 < I_i < 17.63) & \Delta = \frac{3}{5}(I_r + 0.45 I_i) + \frac{2K}{3} \\ \theta > 10^\circ & (I_i > 17.63) & \Delta = \frac{3}{5}(I_r + 1.5 I_i) + \frac{K}{2} \end{array} \right\} \dots\dots(3.45)$$

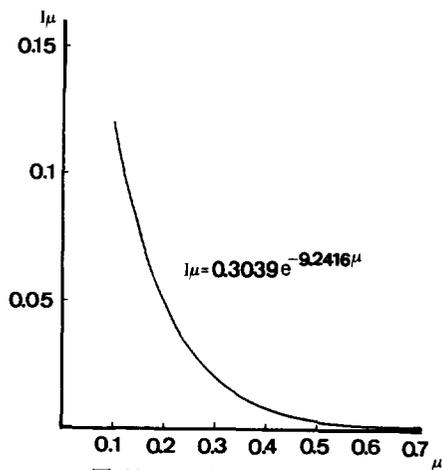


図 29.  $I_{\mu}$  と  $\mu$  の関係

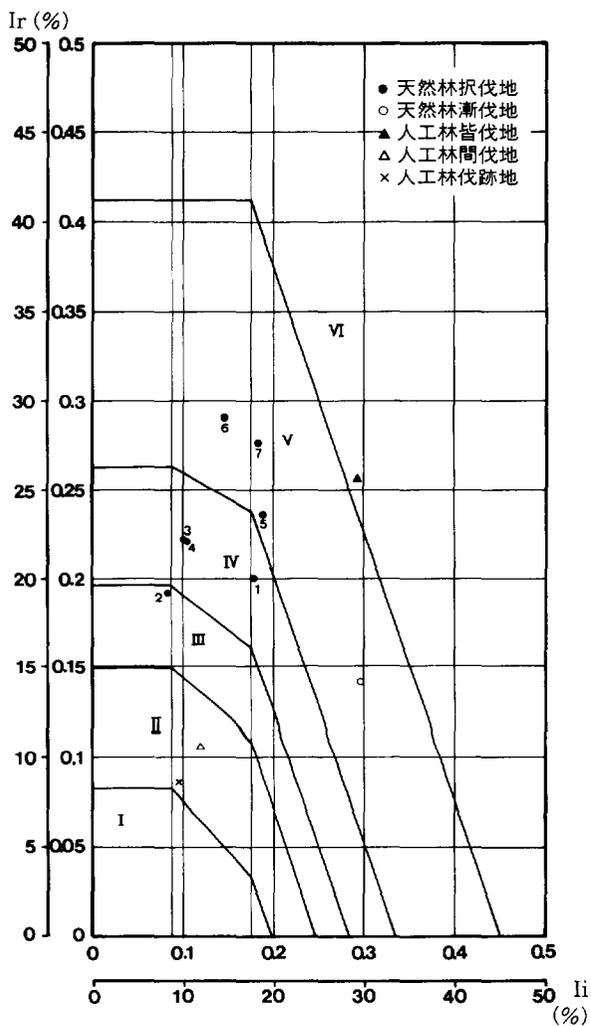


図 30. トラクタ集材地形の地形区分

表 18 は、第 II 章で示した各調査地について、そのトラクタ地形指数を示したものである。各地形要素は表 3～表 6 および表 10 から得たものであり、地表状態については各調査地の土質や含水状態から表 11 や表 15 より  $\mu$  を推定したものである。下式はそれぞれ誘導した走行難易度の式とトラクタ地形指数  $\Delta$  の式を示したものである。表から、各調査地のトラクタ地形指数  $\Delta$  は、ほぼ  $\eta$  の値に一致しており、 $I_r$  と  $I_i$  の値を求めることによって簡易にトラクタ集材地の地形区分が可能となる。図 30 はそれぞれ縦軸に  $I_r$ 、横軸に  $I_i$  の値をとり、トラクタ地形指数との関係を図示したものである。図中の各線は、表 14 に示した 6 区分のトラクタ地形区分の範囲を示したものであり、表 18 の各調査地について、それぞれ適用したものである。

図からわかるように各調査地は、トラクタ集材可能な地形として認められるが、天然林地ではその地形区分は“困難(IV)”や“きわめて困難(V)”の区分に相当する場合が多い。また一斉人工林地では、立木密度が高く、地表状態の影響も加味されたためその地形区分は、トラクタ集材不可能地(VI)に区分されている。さらに人工林伐跡地や数度の間伐が実施された間伐地では、立木を含めた障害物密度が小さく、地形も緩傾斜のためその地形区分は“容易(II)”に区分されている。

以上のように、トラクタ集材現場の地形把握は、各現場の地形要素の条件がわかれば  $I_r$  および  $I_i$  を求めることにより図 30 を適用することから、その現場の地形区分が可能となるし、また指数  $I_r$  および  $I_i$  から式(3.45)のトラクタ地形指数  $\Delta$  を算定することにより、その現場の集材に対する成否や難易度を簡易に判定することが可能となる。本報では、集材積載方法の違い、あるいはトラクタ機種の違い等の関係については考慮していないが、ここで得た結果に補正值等を与えてやればトラクタ集材作業の予測の判断基準を与えるものとして利用が可能と考えられる。すなわち、トラクタ集材計画の立案の際の林地条件の把握として経験や勘による把握あるいは個々の因子ごとの把握に比べ、より客観的かつ全体的な評価が可能となる。

#### 第 IV 章 要 約

本報告は、トラクタ集材路網計画にかかわる問題として、各種の集材現場に対して、技術的かつ経済的に適切な集材方法や集材路網計画を確立しようとする場合の前提となる地形・地表条件の定量化およびその把握表示法を明らかにすることをめざしたものである。そのためには、まずトラクタ集材作業や集材路網導入に際し影響を与える林地条件について、地形傾斜、地表障害物および地表状態を取り上げ、わが国の代表的なトラクタ集材地を調査対象としながら、その記述表示法を理論的かつ実験的に明らかにした。また、想定林地を設定してトラクタ走行難易度と林地条件の関係を明らかにし、走行難易度によるトラクタ地形の地形区分を行った。さらにこれらの関係からトラクタ集材地形のための地形指数を明らかにし、実際のトラクタ集材現場への適用について考察した。

以下各章で得られた結果を要約する。

1. トラクタ集材に影響を与える地形傾斜の評価として、対象地の地形の急峻度と複雑度は、一般に平均傾斜によって代表できるが、トラクタ集材路の導入等に対する地形評価としては、平均傾斜のほかに傾斜度の分布と地形の型(傾斜方向の分布状態)の因子が必要と考えられ、この 3 因子から任意の与えられた条件の原地形モデルの作成が可能となった。

2. 地表障害物の評価としては、障害物密度、大きさおよび分布状態が対象となる。地表障害物 1 個当

たりの大きさは、天然林地および人工林地における各障害物とも、ほぼ対数正規分布型となることがわかった。また、立木の径級分布は林分によって異なり、天然林では対数正規型、一斉人工林では正規型となり、間伐林分では、対数正規型と正規型の複合型分布を示した。また、障害物の出現頻度についてスウェーデン地表粗さ表示法によってわが国の代表的なトラクタ集材地を評価すると天然林地では4~5クラス、すなわちトラクタ走行上かなり困難なクラスに相当し、人工林地では2~3クラス（容易~中程度）となることが示された。

さらに障害物の分布の仕方は、一斉人工林地では二項分布~正規分布となり、天然林地、間伐地および伐跡地ではポアソン分布に従うことがわかった。障害物の分布状態を判別する場合一般には第1位最近隣距離が適用されるが、トラクタの目的点への到達難易等に対する評価に対しては、第2位以上の最近隣距離についても必要であり、これらを考慮した場合の分布状態の判定指標について究明した。

3. 地表状態の評価は地表の地耐力で表される。WESのトラフィカビリティー評価法によってトラクタ集材地を評価すると、特殊な地表状態（降雨・積雪後等の泥濘状態、湧水箇所）を除いては、地表の地耐力は4~5 kg/cm<sup>2</sup>となり、7tクラスの集材用トラクタに対しては、走行上問題はなく、最急登坂勾配はホイールトラクタで、ほぼ15°~22°、クローラトラクタでは17°~27.5°となり、地表状態の評価はトラクタの登坂力に関連させることが可能となる。換言すれば、地表状態とトラクタ登坂角の媒介パラメータとして粘着係数を用いることにより地表状態を記述することができた。

4. トラクタ走行の到達難易度について、想定林地を設定しシミュレーション試験により林地条件との関係を明らかにした。その結果、林地条件に対するトラクタ走行難易度は、地形傾斜、地表障害物の密度と平均径、地表状態（粘着係数）およびトラクタ幅の各因子を含む関係式で表されることが明らかとなった。

5. 走行難易度と林地条件の関係式から、それぞれの地形要素は、地表障害物に関する指数 ( $I_r$ ) と地形傾斜と地表状態に関する指数 ( $I_t$ ) に分けて与えることができ、それぞれ指数  $I_r$  および  $I_t$  からなるトラクタ地形指数を提示することができた。また、このトラクタ地形指数により、トラクタ集材地形を簡易に地形分類することが可能となった。

以上が本報告で究明した主要事項の概要である。ここで得た地形分類の方法は、トラクタ集材作業における、トラクタ機種や集材積載方法の違い、あるいは集材作業の仕方の違いといった具体的な問題に対しては考慮されていないが、与えられた標準的な値を、それぞれ現地修正することによって利用は可能となる。こうした意味から、この方法は、完成されたものではなく、今後検討しなくてはならない多くの問題が残っている。

なお、本報告は、次の第2報とで一つの論文を構成するものであるが、紙面そのほかの都合で分割したものである。したがって、本報告では謝辞等については省かせていただいた。

## 引用文献

- 1) Proceeding of the meeting of the section 3. IUFRO, 1981 (第17回 IUFRO 大会組織委員会編 (訳): 第17回 IUFRO 世界大会論文集, pp. 930, 1981)
- 2) GOMBRICH, L.: Terrain classification for Swedish Forestry, Skogsarbeten, 18 pp, 1969
- 3) Proceeding of the meeting of the section 32. IUFRO, 1964 (後出5), 6), 8) の論文)

- 4) Thinning and mechanization, IUFRO meeting. Sweden, 1969
- 5) STEINLIN, H.: Der einfluss des geländes auf die holzernte. IUFRO, Sec., 32, 85~96, 1969
- 6) STRØMNES, R.: Terrain classification in forest district. IUFRO, Sec., 32, 139~148, 1969
- 7) SAMSET, I.: Terrain classification of forest areas in the Greek mountains. Norwegian Forest Res. Inst., 579~628, 1967
- 8) VIK, T: Classification of terrain by the Norwegian Forest Survey. IUFRO, Sec., 32, 213~235, 1964
- 9) FAO: Evaluation of accessibility of forest resources. Roma, 1972 (上飯坂実抄訳: 森林利用研究会資料, No. 84, 1972)
- 10) ADAMOVICH, L.: Road network and roadspacing planning. Vancouver, 1975 (上飯坂実抄訳: 森林利用研究会資料, No. 88, 1976)
- 11) 林道計画委員会: 合理的林道網計画資料. 林業土木コンサルタント, 東京, 92 pp., 1966
- 12) KATO, S.: Studies on the forest road system -Preliminary report on the road density- Bulletin of the Tokyo Univ. Forests, **63**, 215~232, 1967
- 13) 上飯坂実: 森林利用学序説. 地球出版, 東京, 234 pp., 1971
- 14) 堀 高夫: 路網計画のための図上地形判定について, 日林誌, **47** 4, 168~170, 1965
- 15) 堀 高夫 外: 森林利用学的地形分類に関する研究. 81回日林講, 351~352, 1970
- 16) BEKKER, M.G. 外: Obstacle performance of wheeled vehicles. U.S. Army L.L.L. Rep. No. 28, 1958
- 17) BEKKER, M.G.: Off-the-road locomotion. Univ. of Michigan Press., 220 pp, 1960
- 18) BEKKER, M.G.: Introduction to terrain-vehicle systems. Univ. of Michigan press., 846 pp., 1968
- 19) ADDOR, E.E.: The effect of stem spacing on vehicle performance. W.E.S., Rep. No.3-610, 1963
- 20) SCHOLANDER, J.: Vehicle steering capacity and terrain roughness, Research notes, Nr. 57, Institutionen för Skogsteknik, Skogshögskolan, Stochholm, 52 pp, 1972
- 21) HAARLAA, R.: The effect of terrain on the output in forest Transportation of timber, J of Terramechanics. **12** 2, 55~94, 1975
- 22) 堀 高夫: 車両が林内不整地を走行する際に遭遇する地表障害物の出現頻度に関する考察, 日林誌, **52** 2, 58~61, 1970
- 23) 井上源基: トラクタ集材作業における障害物の影響(Ⅱ) 86回日林講, 490~492, 1975
- 24) 村山茂明 外: 林内走行車を開発するための基本的な問題点. 農経新報, **31** 3, 112~115, 1983
- 25) 村山茂明: 林内走行車を開発について(Ⅳ) 一傾斜と走行性との関係-94回日林論, 675~678, 1983
- 26) YAMAWAKI, S.: Experimental investigation on the performance of tractor-powered reforestation machines on the artificial forest land of Japan. Bull. of the Gov. For. Exp. Sta. **213**, 73~177, 1968
- 27) 猪内正雄: 集材用トラクタの性能解析に関する基礎的研究. 岩大演習林報告, **11**, 139 pp., 1980
- 28) 上飯坂実 外: 地表障害回避のための林内走行車の作業機能最適化に関する研究. 文部省科学研究報告書, 63 pp., 1985
- 29) 中村英夫 外: Digital terrain model. 東大生産研究, **20** 8, 410~415, 1968
- 30) 村井俊治: 地形の数量化(Ⅱ). 土木学会誌, **58** 1, 93~99, 1973
- 31) DAVIS, J.C.: Statistic and data analysis in geology. Wiley Inter. Edition, New York,

- 550 pp., 1973
- 32) 平野昌繁 外: 西南日本に例をとった電子計算機による地形数値解析, 地理評, **49**, 440~454, 1976
- 33) 堀 高夫 外: 集運材地域の平均傾斜法. 日林誌, **47** 10, 337~341, 1965
- 34) 堀 高夫 外: 集運材地域の平均傾斜法(Ⅱ) 一等高線長の測定により判定する方法一. 日林誌, **50** 8, 231~237, 1968
- 35) 三宅八郎: 林道全体計画調査におけるデジタルマップの応用. 16回林道研究会, 45 pp., 1980
- 36) 小林洋司: 山岳林における林道網計画法に関する研究. 宇大演習林報告, **38**, 101 pp., 1983
- 37) 北川勝弘: 数値地形モデルによる傾斜因子推定の精度, 日林誌, **58**, 202~213, 1976
- 38) 木平勇吉: 地形解析—数値地形図の作成と応用, 信大林学演習(Ⅱ), 1~29, 1976
- 39) 芝 正己 外: 地形解析に対するスペクトル概念の応用(Ⅶ), 日林関西支部論文集, 337~341, 1980
- 40) 福田正己: 調和解析の地形学への適用とその問題点, 地理評, **48** 9, 647~648, 1975, 1975
- 41) NAKAMURA, H.: Ein digitales geländemodell aus analytischen dargestellten höhenlinien. Proc. of JSCE, **186** 2, 79~86, 1971
- 42) 腰塚武志: 積分幾何学について(1). O.R., **21** 9, 524~529, 1976
- 43) 腰塚武志: 積分幾何学について(2). O.R., **21** 10, 591~596, 1976
- 44) 腰塚武志: 積分幾何学について(3). O.R., **21** 11, 654~659, 1976
- 45) 腰塚武志: 積分幾何学について(4). O.R., **21** 12, 711~717, 1976
- 46) 腰塚武志: 積分幾何学について(5). O.R., **22** 1, 40~45, 1977
- 47) 増山元三郎: 幾何学的調査法の話. O.R., **1** 1, 41~49, 1956
- 48) SANTALO, L.A.: Integral geometry and geometric probability. Addison-wesley, Reading, Massachusetts, 1976
- 49) 栗田 稔: 積分幾何学. 共立出版, 東京, 116 pp., 1957
- 50) 栗田 稔: 基礎講座 確立の手引き(8). 数学セミナー, **17** 12, 90~95, 1978
- 51) 古山正雄: 都市の形について. O.R., **22** 1, 20~30, 1977
- 52) 林知己夫 外: 動く調査対象集団に対する標本調査について(Ⅲ). 統計数理研究所彙報, **17** 1, 5~21, 1969
- 53) STRAHLER, A.N.: Quantitative slope analysis. Bull. of the geological Soc. of Am., **67** 5, 571~596, 1956
- 54) 中野尊正 外: 地形調査法. 古今書院, 東京, 16~61, 1968
- 55) 山本壯毅 編: 陸水(地球科学講座9). 共立出版, 東京, 127~131, 1968
- 56) STRAHLER, A.N. 外: Objective and quantitative field methods of Terrain Analysis. Dept. of geology, Columbia Univ., Rep. Proj. NR 387~021, 1960
- 57) 酒井 昭 外: ヤクーツク地方のダフリアカラマツ. 日林誌, **56** 7, 247~252, 1974
- 58) 高田和彦: 森林の構造モデル. 数理科学, **13** 3, 45~50, 1975
- 59) 鈴木太七: 林学におけるマルコフプロセスの応用. 数理科学, **13** 3, 51~56, 1975
- 60) 石田正次: 森林の保全と自然環境の変化に関する統計的研究. 統計数理研究所彙報, **22** 1, 71~82, 1972
- 61) KING, L.J. (奥野隆史 訳): 地域の統計的分析. 大明堂, 東京, 346 pp., 1973
- 62) 奥野隆史: 地域事象計量分析における諸問題. 行動計量学, **4** 1, 49~58, 1976
- 63) 中村和夫 外: 走行者流動モデルとそのシミュレーション. 人間工学, **10** 3, 93~102, 1974
- 64) 山脇陽治 外: 人間—空間系の研究—パターン係数とポテンシャルを用いたキャンパスの分布特性の把握. 建築学会梗概集, 5020, 469~470, 1973
- 65) 浜田 哲 外: 人間—空間系の研究—メッシュエントロピーによるキャンパス空間の構造と人間の

- 分布との関係. 建築学会梗概集, 5021, 471~472, 1973
- 66) 辻井辰雄 外: 森林作業環境の把握方法に関する研究(1)—情報理論からの接近—林試研報, 280, 29~46, 1976
- 67) 石川義孝: 空間的相互作用モデルにおける「地図パターン」問題について. 地理学評, 54 11, 621~636, 1981
- 68) YEATES, M.H. (高橋潤二郎 訳): 計量地理学序説. 好学社, 東京, 238 pp, 1970
- 69) GETIS, A.: Temporal land-use patterns analysis with the use of nearest-neighbor and quadrat methods. Ann. Associ. of Am. Geographers, 54, 391~399, 1964
- 70) CLARK, P.J. 外: Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. Ecology, 35, 445~453, 1954
- 71) PIELOV, E.C. (南雲仁一 監訳): 数理生態学. 産業図書, 東京, 118~132, 1974
- 72) BLACKMAN, G.E.: A study by statistical methods of the distribution of species in grassland associations. Ann. Bot., 39, 749~777, 1935
- 73) SKELLAN, J.G.: Studies in statistical ecology. Biometrika, 39, 346~362, 1952
- 74) COTTAM, G. 外: Some sampling characteristics of a population of randomly dispersed individuals. Ecology, 34 4, 741~757, 1953
- 75) BLACKITH, R.E.: Nearest-neighbor distance measurements for the estimation of animal populations. Ecology, 39 1, 147~150, 1958
- 76) 巖 俊一: 生物個体群れの空間的分布様式—その解析法をめぐる話題—. 数理科学, 18 1, 72~77, 1980
- 77) 種村正美 外: 点の空間配置パターンを測る—なわばり生態学—. 数理科学, 19 3, 11~16, 1981
- 78) 高見 章 外: 人の集まり方の確率的見方. O.R. 22 1, 31~39, 1977
- 79) 光沢健次郎 外: 土地利用分布パターンの統計解析(1). 建築学会梗概集, 6065, 1123~1124, 1974
- 80) Cox, K.R.: Man, location & behavior. Willy International Editions, 190~205, 1972
- 81) 木暮敬二: トラフィカビリティについて. 土木技術, 26 10, 24~32, 1971
- 82) 太平至徳 外: 連載講座(2) 建設機械施工に関する土質試験—主としてトラフィカビリーについて—. 建設機械, 8 12, 94~100, 1972
- 83) 太平至徳 外: 連載講座(3) 建設機械施工に関する土質試験—主としてトラフィカビリーについて—. 建設機械, 9 1, 89~97, 1973
- 84) CHAPPELL, T.W. 外: Soil trafficability and its application to logging. For. Prod. Journal. 20 2, 51~55, 1970
- 85) 土質工学編: 土質工学ハンドブック. 技報堂, 東京, 55~56, 1965
- 86) 佐野文彦: 急傾斜地の走行性. テラメカニクス, 4, 86~88, 1984
- 87) 佐野文彦: 土と農業—農地造成整備工事で施工機械が難儀するとき—. 土と基礎, 33 2, 88~91, 1985
- 88) 井上源基: シミュレーションによる林内のトラクタ集材路網. 90 回日林論, 501~502, 1979
- 89) 阿部敏夫 外: 地形図による斜面傾斜の計測について. 31 回日林関西支講, 303~305, 1980
- 90) 吉田実夫: トラクタの走行性能の解析. 農機学会誌, 46 2, 248~252, 1980
- 91) MEGILLÉ, X.: Tractor for logging. FAO, Roma, 189 pp, 1957
- 92) 林業機械化協会編: 林業用トラクタとその作業—作業編—. 林業機械化協会, 東京, 251 pp, 1974

(附録) トラクタ走行難易度の算定

まず、地表障害物の影響を無視した場合、すなわち地表障害物密度  $\lambda=0$  の場合について走行難易度  $\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)$  と地形傾斜  $\theta$  の関係をロジスティック曲線に近似すると図 22 のとおりである。図は地表状態(登坂角パラメータ  $\alpha$ ) ごとにプロットしたものであるが、各地表状態に対して  $\theta \geq 10^\circ$  の範囲ではほぼ平行な直線で与えられる。そこで各  $\frac{\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}{K - \eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}$  と  $\theta$  の関係を、 $\theta=10^\circ$  において  $\alpha=35^\circ$  (粘着係数  $\mu=0.7002$ ) を基点に平行移動し、 $\mu=0.7002$  の場合の走行難易度  $\eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)$  と地形傾斜  $\theta$  の関係を算定すると、次式 (1) が得られる。なお、以下の  $r$  は相関係数を示している。

$$\ln \frac{\eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}{K - \eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)} = 27.9131 \tan \theta - 7.3492 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$(\theta \geq 10^\circ, r=0.9625)$$

次に附表は、地表障害物密度  $\lambda=0$  の場合の地形傾斜と粘着係数ごとの走行難易度  $\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)$  の値を示したものであるが、地形傾斜の影響を一定にするために附表の各地形傾斜の  $\frac{\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}{K - \eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}$  の値を  $\mu=0.7002$  の場合の値  $\frac{\eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}{K - \eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}$  で割った値を算定し、 $\mu$  との関係を示すと図 23 となり、これらの関係を求めると式 (2) となる。ただし、 $\theta < 10^\circ$  では  $\frac{\eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}{K - \eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}$  の値は 0 となり、 $\theta \geq 10^\circ$  について成り立つ。

$$\ln \left( \frac{\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}{K - \eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)} \middle/ \frac{\eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}{K - \eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)} \right) = 8.4816 e^{-9.2416\mu} \quad \dots\dots(2)$$

$$(r = 0.9826)$$

すなわち、地表障害物密度を一定 ( $\lambda=0$ ) とした場合の走行難易度は式 (1) と式 (2) から式 (3) が得られる。

$$(\theta \geq 10^\circ)$$

$$\ln \frac{\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}{K - \eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)} = 27.9131(\tan \theta + 0.3039 e^{-9.2416\mu}) - 7.3492 \quad \dots\dots(3)$$

次に、地表障害物と走行難易度の関係についてみる。図 24 は、地表障害物の平均径  $\bar{X}$  が 0.5 m と 1.5 m について地表障害物密度  $\lambda$  と走行難易度  $\eta$  の関係を示したものである。図は地形傾斜および地表状態別にプロットしたものであるが、両障害物の平均径とも  $\theta \geq 10^\circ$  では各地表状態とも  $\lambda$  の増大に対してほぼ同一の増加傾向を示すロジスティック曲線に近似できる。そこで地形傾斜と地表状態の影響を一定にするために図の各直線について  $\lambda=0$  の  $\frac{\eta}{K - \eta}$  の値を 1 に平行移動(各地形傾斜および地表状態ごとの  $\frac{\eta}{K - \eta}$  の値を  $\lambda=0$  の場合の値  $\frac{\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}{K - \eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}$  で割る)して、地表障害物  $\lambda$  との関係を示すと図 25 となり、式 (4) が得られる。

附表：地表障害物密度が一定の場合 ( $\lambda=()$ ) の地形傾斜, 地表状態別の  
の走行難易度

$\theta \backslash \mu (\alpha)$	0 (0)	0.0875 (5)	0.1763 (10)	0.2679 (15)	0.3640 (20)	0.4663 (25)	0.5774 (30)	0.7002 (35)
0	80.467 ( $\infty$ )	0 (0)						
5	80.467 ( $\infty$ )	47.664 (1.453)	10.190 (0.145)	2.721 (0.035)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
7.5	"	50.471 (1.683)	14.379 (0.217)	4.411 (0.058)	1.094 (0.014)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
10	"	60.920 (3.117)	20.221 (0.336)	7.549 (0.104)	5.544 (0.074)	4.725 (0.062)	4.404 (0.058)	4.195 (0.055)
12.5	"	73.637 (10.781)	49.987 (1.640)	32.597 (0.681)	27.413 (0.517)	24.314 (0.433)	23.398 (0.410)	22.784 (0.395)
15	"	80.467 ( $\infty$ )	73.726 (10.937)	66.345 (4.698)	59.270 (2.796)	56.552 (2.365)	55.538 (2.228)	54.949 (2.153)
17.5	"	"	80.467 ( $\infty$ )	75.076 (13.926)	70.114 (6.772)	67.849 (5.377)	66.667 (4.831)	66.667 (4.831)
20	"	"	"	80.467 ( $\infty$ )	77.281 (24.256)	76.204 (17.876)	75.635 (15.715)	75.635 (15.715)
25	"	"	"	"	80.467 ( $\infty$ )	80.467 ( $\infty$ )	79.861 (131.784)	79.861 (131.784)
30	"	"	"	"	"	"	80.467 ( $\infty$ )	80.467 ( $\infty$ )
35	"	"	"	"	"	"	"	"

( ) は  $\frac{\eta_{\lambda=0}}{K-\eta_{\lambda=0}}$

(地表障害物平均径  $\bar{X} = 0.5 \text{ m}$ )

$$\ln\left(\frac{\eta}{K-\eta} / \frac{\eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}{K-\eta_{\lambda=0, \mu=0.7002}(\theta)}\right) = 35.9105\lambda - 0.0250$$

(r=0.9839)

(地表障害物平均径  $\bar{X} = 1.5 \text{ m}$ )

.....(4)

$$\ln\left(\frac{\eta}{K-\eta} / \frac{\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}{K-\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}\right) = 58.2298\lambda - 0.0277$$

(r=0.9849)

そこで、地表障害物密度とその平均径およびトラクタ幅  $b$  を含む関係式としてトラクタの障害物遭遇頻度  $\lambda\omega$  (ただし、 $\omega = b + \bar{X}$ ) を与え、 $\lambda\omega$  と走行難易度  $\eta$  の関係を示すと図 26 (左) となり、これらの関係を算定すると式 (5) が得られる。

$$\ln\left(\frac{\eta}{K-\eta} / \frac{\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}{K-\eta_{\lambda=0}(\theta, \mu)}\right) = 18.3891\lambda\omega - 0.0169 \quad \dots\dots\dots(5)$$

(r=0.9810)

すなわち、各林地条件に対する走行難易度  $\eta$  は式 (3) と式 (5) から式 (6) が得られる。

$$\eta = \frac{K}{1 + 1581.4530 e^{-(18.3891 \lambda \omega + 27.9131(\tan \theta + A))}} \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 $A = 0.3039 e^{-9.2416 \mu}$ 、 $K = 80.467$ 。

以上述べた関係は、 $\theta \geq 10^\circ$  の範囲に対して成り立つものである。 $\theta \leq 5^\circ$  では図 21 から明らかなように走行難易度は傾斜の影響は、ほとんどなく地表障害物の平均径や密度に関係する。図 26 (右) は、 $\theta = 0^\circ$  と  $5^\circ$  の場合のおおのの地表状態ごとの走行難易度についてトラクタの障害物遭遇頻度  $\lambda \omega$  との関係を示したものである。図から、地形傾斜  $5^\circ$  以下の走行難易度  $\eta$  は  $\lambda \omega$  にのみ関係し、次式 (7) が得られる。

$$\eta = \frac{K}{1 + 41.7709 e^{-21.5047 \lambda \omega}} \dots\dots\dots(7)$$

( $r = 0.8871$ )

さらに、 $5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$  の範囲の走行難易度は、地形傾斜の増大とともにロジスティック関数で増大することから、この範囲内の走行難易度の関係式は、近似的に  $\theta = 5^\circ$  と  $\theta = 10^\circ$  の時の各  $\ln \frac{\eta}{K - \eta}$  の値を結んだ線分で表される。すなわち式 (6) と式 (7) より、 $5^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$  の走行難易  $\eta$  は式 (8) となる。

$$\eta = \frac{K}{1 + 41.7709 e^{-(C + 21.5047 \lambda \omega)}} \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $C = (14.4955 + 95.5269 e^{-9.2416 \mu} - 35.0856 \lambda \omega)(\tan \theta - 0.0875)$

式 (6)、(7) および (8) を地形傾斜の範囲別に示したものが本論の (3.31) 式となる。

**Studies on the Tractor Skidding Road Network Planning I**  
**Terrain classification of the forest land in tractor logging site**

Motoki INOUE

Summary

The objective of this study is primarily to confirm the method of estimating terrain conditions or topography of the forest land which will be the most fundamental and to give the predominant factors necessary for obtaining a both technically and economically optimal location and design for the tractor skidding road network.

To achieve this, the first step of this study was investigated ways to classify the different kinds of terrain conditions, that might influence the tractor logging operation and the technical difficulty of skidding road construction.

The nature of the terrain or the topography of the forest land in tractor logging sites was quantitatively analysed by a statistical treatment of a sufficient number of field investigation results. The differences among them were most objectively given by the numerical value of the "Terrain-Index for tractor logging" which could allow a universal and direct application throughout each felling site in our country.

Thus, this definition and the results of several field investigations will give practical information that is closely related to the tractor skidding road network system. Moreover it will make contributions for better mobility of logging tractors more profitable logging, and more careful treatment of individual forest stands.

The results obtained in each chapter are summarized as follow.

1) From investigations of the typical tractor logging sites in Japan, three main factors which would influence the tractor logging operation were taken into account. They are (1) The gradient of the terrain surface (average gradient in %, the standard deviation of the gradient, and the distribution of the azimuth of the maximum hillside slope) (2) Ground roughness (the density of obstacles in number per ha, the average obstacle diameter in m, and the spatial distribution of the obstacles) and (3) The ground condition (the soil type, and the ground moisture supplemented by humidity in %).

The nature of the respective kinds of terrain conditions was objectively given by the differences in these factors.

2) The technical difficulties of the skidding road construction were analyzed by utilizing computer-simulated models, which consisted of various assumed logging sites

---

Received December 23. 1986

(1) Forest Mechanization Division

having the three different factors that are presented in 1). In this way, the technical difficulties of the skidding road construction could be expressed by means of the regression equation involving these three factors and the factors relating to basic properties of logging tractors.

This equation was statistically proved after repeating many experiments.

3) For the method of evaluating terrain conditions in tractor logging operations, the formula, which comprises the element ( $I_r$ ) relating to the ground roughness and the element ( $I_i$ ) relating to the gradient of the terrain surface and the ground condition, could be given by a numerical value and might be called "Tractor terrain-Index". Using this index formula, the terrain conditions for the tractor logging site can be clarified simply and objectively.

Thus, this index formula might be available as the standard of judgement for selecting the most suitable and reasonable tractor skidding road network plan.