

トラクタ集材路網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

井 上 源 基⁽¹⁾

Motoki INOUE : Studies on the Tractor Skidding Road Network
Planning II. Optimum planning of the tractor skidding
road network for tractor logging

要 旨 : 集材路網計画は、集材路を「どこに」「どれだけ」あるいは「どのように」導入するかということであらかじめ計画してやることであり、適正な集材路網密度であるかどうかあるいは適正な集材路網配置であるかどうかは、集材作業の成否を決定する重要な因子となる。本報では、トラクタ集材路網計画に関する諸事項について検討するとともに、集材路網の配置計画法について総括的に論じた。主要な成果は次のとおりである。

1) トラクタ集材路網の特徴を把握する方法として、集材路網の配置の偏りを表す指標 (f 値) と集材路網の形態の違いを示す指標 (p 値) を提示し、これらの指標による集材路網の分類法を明らかにした。一般的なトラクタ集材路網では f 値は $\pi/2$, p 値は $2/3$ となることがわかった。

2) トラクタ地形傾斜区分ごとの最適集材路網型および集材方法は、地形が平坦～緩斜地では単線型路網や放射型路網となり、伐倒木近くまでトラクタを導入する集材方法となる。中斜地では集材距離が最も小さくすむ樹枝型路網となり、平均木寄せ距離が約 15 m になるように集材路網を配置する方法となる。また急傾斜地では、幹線作業路を並設した路網型となり、地形傾斜ごとの幹線作業路と作業路の合理的な密度分坦比を明らかにした。

3) 本研究の適用例として実際の集材地を対象にトラクタ集材路網計画を行った。その結果、適正集材路網密度や具体的な集材路線の選定を一貫して電算機処理することが可能となり、集材路網の型や配置、導入順序、集材路の等級の配分に対する客観的な評価が得られることが明らかとなった。

目 次

第1章 緒論	3
第1節 本研究の目的と構成	3
第2節 研究範囲と既往文献	3
第3節 わが国のトラクタ集材作業の現状	4
第II章 トラクタ集材路網パターンの分類と事例分析	6
第1節 緒言	6
第2節 トラクタ集材路網の構成特徴と幾何学的な把握	7
第3節 集材路網の機能的分類	12
3.1 集材路網モデルと集材路網配置指標	12
3.2 対象域区内の到達距離の分布関数	19
第4節 集材路網の形態的分類	23
4.1 形態的分類指標の算定	23
4.2 集材路網形態と集材走行距離	26

第5節	トラクタ集材路網の事例分析	35
5.1	トラクタ集材作業に関する因子	35
5.2	トラクタ集材路網パターンとその要因	38
5.2.1	伐区形状とトラクタ集材路網パターン	39
5.2.2	地形傾斜とトラクタ集材路網の配置	42
5.2.3	林道・作業道とトラクタ道の関係	45
第Ⅲ章	想定試験によるトラクタ集材路網の配置	47
第1節	緒言	47
第2節	トラクタ集材路網導入のための手法概要	47
2.1	集材林地モデルの設定	47
2.2	トラクタ集材路網型の設定	48
2.3	集材積載量と集材路導入評価値	51
2.4	トラクタ集材路網導入のための制約条件	52
2.5	電算解法の手順	53
第3節	林地条件とトラクタ集材路網の配置	56
3.1	集材木の分布状態と集材路網の配置	56
3.2	平坦地形における集材路網の配置と集材路網型および土場数	56
3.3	地形傾斜と集材率、木寄せ幅および集材路網密度	59
3.4	地表障害物の密度と集材路網密度	66
3.5	トラクタ総走行距離と集材路網密度	73
第Ⅳ章	トラクタ集材作業における最適集材路網	74
第1節	トラクタ集材作業の集材所要人工数の算定	74
第2節	トラクタ集材所要人工数と集材路網型	78
2.1	集材所要人工数を最小にする集材路網型と木寄せ幅	78
2.2	トラクタ地形区分と最適集材法	81
第3節	急傾斜地におけるトラクタ集材路網の配置	89
3.1	幹線作業路と作業路および木寄せ幅に関する想定試験の結果	89
3.1.1	幹線作業路密度と最大集材幅	90
3.1.2	最大集材幅ごとの作業路密度と木寄せ幅および集材率	90
3.1.3	地形傾斜と最大集材幅、木寄せ幅および集材率	92
3.2	幹線作業路と作業路および木寄せ幅の合理的な分岐点	97
3.2.1	幹線作業路密度と作業路密度	98
3.2.2	最小所要人工数を与える木寄せ幅および幹線作業路と作業路の分岐比	98
第4節	集材現場におけるトラクタ集材路網配置計画（適用例）	104
第Ⅴ章	要 約	118
謝 辞		120
引 用 文 献		120
Summary		124

第Ⅰ章 緒 論

第1節 本研究の目的と構成

本研究は、トラクタ集材技術に係る問題として、各種の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ことを目的としたものである。第1報においてはトラクタ集材路網計画のための前提となる地形、地表条件についてその評価法を明らかにしたが、本報では、特にトラクタ集材路網の配置計画法を確立することを目的とするものであり、関連する各種の要因の分析などを究明することも含まれている。

Ⅱ章以降取り扱っている内容について示すと次のとおりである。

第Ⅱ章では、トラクタ集材路網に関する問題として、まずトラクタ集材路網の幾何学的な考察を行い、トラクタ集材路網の特性について評価検討し、パターン化について理論的に究明した。また国有林を対象に現在実行のトラクタ集材路網の配置およびその形態について比較検討を行うとともにトラクタ集材路網の配置や形態に影響を与える地形傾斜、伐区形状などの関係について検討した。

第Ⅲ章以降では、トラクタ集材路を導入するにあたり、集材効率を最大にするトラクタ集材路網の配置計画の方法について究明した。まず、矩形伐区モデルを用いて土場数および位置、木寄せ幅、トラクタ集材路網の形態などの違いによる集材路網密度や配置の関係を究明するとともに地形条件の違いによる集材率の関係について検討した。また、経済的側面および技術的側面から、それぞれのトラクタ集材現場に適した集材方法について評価検討を行い、林地条件、施業条件等ごとに最適なトラクタ集材路網型、木寄せ距離および土場数について述べ、最も好ましい集材路網の選定や導入の方法について検討した。最後に、トラクタ集材路網配置計画法を実際の集材現場に適用しながらトラクタ集材路網型や配置、導入順序、集材路の等級別の密度配分などについて具体的かつ総合的に検討した。

本研究の結果は、現在行われているトラクタ集材が妥当な方法であるか否かの判断を与えるもので、トラクタ集材計画の立案の際の基礎資料を提供することを目的としている。

第2節 研究範囲と既往文献

トラクタ集材に関する研究は、トラクタが集材機に比べ普及が遅かったため、架線集材に関する研究に比べて少なく、従来は主としてトラクタ自身の構造や性能に関する研究が多く、集材作業の方法や集材路網に関する研究は、まだきわめて少ない。

トラクタ集材に関する研究は最初、西ドイツやアメリカを中心とする先進諸国で行われたが、当時はいずれも集材に関する概念的なものであり、細部にわたる集材工程の検討や地形条件などを考慮した究明には至っていない。

集材に関する基本的方法を展開し、路網と関係づけたのは MATTHEWS, D.M.¹⁾ である。以来この研究を中心に多くの報告がなされることになるが、路網関係を中心に既往の研究について概要を述べる。

トラクタ集材路網は幾何学的に見ると線分の組み合わせにより構成されるものであり、車輛類の走行

を対象とするかぎり林道や作業道の場合と類似した研究として取り扱われる。

路網密度に関する研究は、加藤^{2),3)}によれば大別して次のような研究系列に分けられる。一つは、西ドイツ、オーストリア、スイスなどの中欧諸国において進められたもので、集材方法に主体をおき、その集材方法に適する集材距離を基礎として林道の配置あるいは路網密度を決定する考えである。これについては PESTAL, E.⁴⁾ や HAFNER, F.⁵⁾ らの報告があげられる。今一つは、MATTEWS, D.M.¹⁾ に代表される集材費と林道開設費の合計を最小にする路線間隔について考える理論であり、最小素材原価方式とも称せられるものである。これらの研究範ちゅうに属するものとして、諸外国での幾多の報告^{6)~10)}を始めわが国でも幾つかの研究^{2),11)~14)}が報告されており、路網理論を展開する際の基礎となっている。さらに、この理論を発展させた南方¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾による林業総収入から造林費などの一般必要経費を差し引いた差額を林道開設に当てる場合の限界林道密度の理論がある。

最近、小林¹⁸⁾による林道密度計画以後の林道計画手法についての研究や南方¹⁹⁾による低規格の林道と上級林道を組み合わせた複合的な路網体系に関する研究など新しい路網の考え方が展開されてきている。

しかし、以上述べたこれらの研究は、いずれも林道や副林道を主体としたものであり、低規格の作業道やトラクタ集材路に対しては考慮されたものではない。

トラクタ集材路や低規格作業道などの路網に関する研究はきわめて少なく、SAMSET, I²⁰⁾の間伐材伐出のための路網配置として林道、作業道および集材路を含めた路網間隔やレイアウトを示した報告、ABEGG, B.²¹⁾のトラクタ集材地形における最適集材路網密度を算定した報告およびSTAAR, K.A.G.ら²²⁾の伐出作業のための集材路網パターンを示した報告等があるが、これらの集材路網に関する考え方もMATTEWSの路網間隔理論が基礎となっている。

わが国におけるトラクタ集材路網の密度や配置に関する研究として、大河原^{23)~26)}はトラクタ集材距離とトラック作業道密度の合理的関連性について集材総仕事量の概念を導入し、分岐点理論を展開しているが、その他にトラクタ集材路網の密度や配置に関する研究はほとんど報告されていない。しかし、これらに類似する作業道、すなわち使用期間が終了すれば林地に復帰させることを前提とした路網に関する密度や配置についての研究としては青木²⁷⁾の高密作業路網に関する報告や平賀^{28),29)}による電算手法を用いた作業道の最適路網配置計画に関する報告などがある。

いずれにしてもこれらの研究は、それぞれある限られた条件や手法によるかなり大きい面積規模の団地を対象とする路網計画であり、トラクタ集材作業などにかかわる微細な地形、地表因子については考慮されていないし、また、路線の導入開設の順序あるいは幹線、支線、分線といった複合路線の配置を具体的に示すための評価はなされていない。

第3節 わが国のトラクタ集材作業の現状

わが国の林野面積は、国土総土地面積の約68%にあたる2520万haを占め、その内約98%が森林面積となっている。また森林面積のうち国有林地は、ほぼ30%の752万ha、民有林地は1767万haであり、森林面積の約97%が立木地である。さらに天然林と人工林の割合をみると森林面積の57%が天然林、39%が人工林となり（残りは混交林）、10年前に比べると人工林は24～

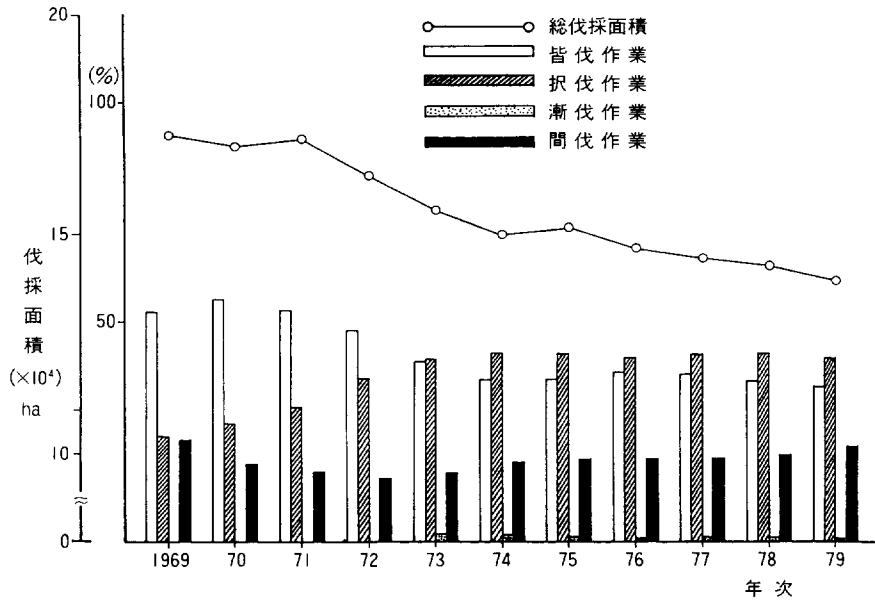


図 1. 施業方法別の伐採面積の推移（国有林）

25% 増加し、反面天然林は約 10% 減少している。また地域的にみると人工林率 50% 以上の地域は四国、九州、東海地方であり、過去 10 年間に人工林率の上昇が著しい地域は北海道、北陸、中国、四国などとなっている³⁰⁾。

図 1 は、過去 10 年間の国有林における施業方法別伐採面積を示したものであるが全体の伐採面積は昭和 46 年を境に減少の一途をたどっている。また皆伐と非皆伐の伐採面積比率をみると、非皆伐施業面積が 60% 以上を占め、そのうち択伐林施業地が年々増加していることがわかる。また集材方法について昭和 55 年度の国有林における直営生産による集材作業実体を分析したところ調査件数 1421 件中、非皆伐施業 413 件についてとりまとめると表 1 のとおりである。表からトラ

表 1. 国有林非皆伐施業と集材方法

集材方式		集材地数	%
架線集材	1 タイラー方式	7	3.59
	2 エンドレス タイラー方式	76	38.97
	3 フォーリング ブロック方式	20	10.26
	4 ホイスト ヤーディング方式	7	3.59
	5 スラック ライン方式	14	7.18
	6 ランニング スカイライン方式	35	17.95
	7 ダンハム方式	3	1.54
	8 モノケーブル方式	22	11.28
	9 ハイリード方式	9	4.62
	10 その他	2	1.03
小 計		195	100.00
集トラクタ	1 ホイール型トラクタ方式	21	8.08
	2 クローラ型トラクタ方式	159	61.15
	3 併用方式	80	30.77
小 計		260	100.00
(人力集材)		2	100.00

クタによる集材は全体の 50% 以上を占めており、トラクタ集材作業に対して主にクローラトラクタが使用されていることがわかる。また地域別に集材方法をみると図 2 から、トラクタ集材は主に北海道や東北地方などの緩斜地に好んで実施される傾向がうかがえる。

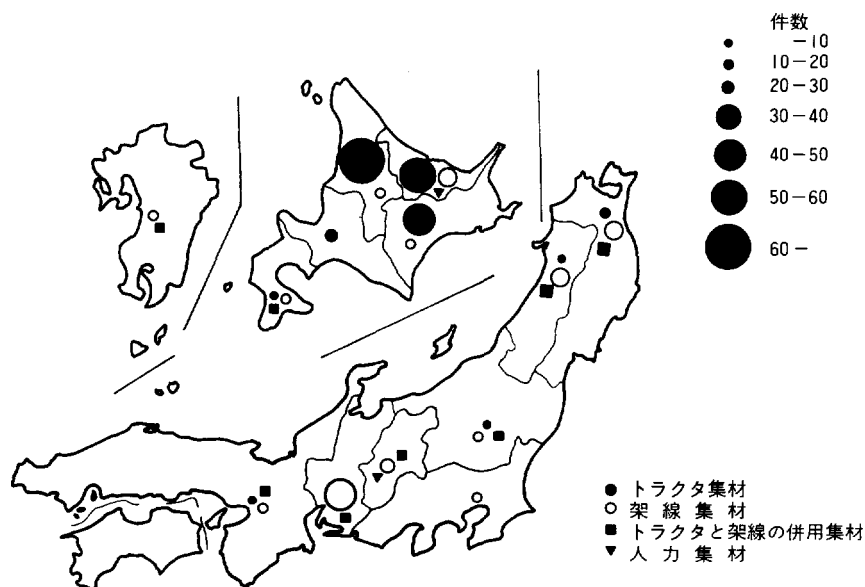


図 2. 地域別の集材方法（国有林）

全国森林資源現況によると、わが国の地形傾斜別森林面積は、傾斜が 10° 以下の平坦～緩斜地は全体の 17.5% となり、一般にトラクタ集材が可能とされる 20° 未満の森林面積は全体の約 42% を占めている。トラクタ集材を可能とする最大限の傾斜をたとえば 30° とすると、その面積はほぼ 71% も占めることになり、わが国が諸外国に比べ急峻でトラクタ集材に適さないといわれるわりにトラクタ集材の可能性は大きいといえる。

わが国においてトラクタが林業用集材のために本格的に使われるようになったのは、1954 年の 15 号台風により北海道に大量に発生した風倒木に対する処理として用いられたことに始まる。それ以来北海道ばかりでなく全国の緩斜地を中心に年々トラクタが集材作業用に定着してきたがその歴史はまだ 30 年たらずである。現在わが国で集材用として使用されているトラクタの台数は国有林ではクローラトラクタおよびホイールトラクタそれぞれ 726 台および 659 台であり、民有林ではクローラトラクタが 2937 台、ホイールトラクタが 1107 台となっている³¹⁾。最近では、特に民有林においては林内作業車と呼ばれる小形車輛の普及も目ざましく、トラクタを含めた車輛類による集材方式が日増しに増大していくことが推察される。

第 II 章 トラクタ集材路網パターンの分類と事例分析

第 1 節 緒言

集材作業方法を考える場合、まず作業を最も能率よくしかも安全に実行できることが前提となり、経済的にみて生産費の大半をしめる集運材工程の合理化を計ることが主題となる。すなわち、トラクタ集材でいうとトラクタ集材路網の費用と便益の関係から、様々な現場条件に対してトラクタ集

材路網の適正な密度や配置を見出すことに帰着する。

本章では、MATTHEWS 以来展開されてきた路網密度理論をさらに展開させるとともにトラクタ集材路網に適用し、トラクタ集材路網の配置に関する理論的考察を行った。またこの考察に基づきトラクタ集材路網の分類化について検討した。

また国有林を対象に収集したデータを基にトラクタ集材路網の配置や形態について比較検討を行い、トラクタ集材路網の配置計画の立案の際の評価値について検討した。

第2節 トラクタ集材路網の構成特徴と幾何学的な把握

トラクタ集材作業における集材路網は、林道や作業道と違って工作物を設けたり、路体を施工することは少なく、路網の構成形態も様々である。しかし、路網の導入の仕方だけを取り上げてみても、一見多様に見えるこの集材路網も現場の条件、例えば地形や地表条件、伐区の形状や大きさといった条件あるいは集材量、伐採方法の違いなどの要因により制約を受けることになり、それぞれの現場条件に適応した一定の集材路網が構成されることになる。例えば、トラクタ集材路網の構成に関し、次のような特徴を有していることが多い。

- ① 集材作業を目的とするため集材区域（伐区）が対象となり、伐区の端から端を横切る輸送路的路網形態は少ない。
- ② 路線が交差する場合、4 差路の交差は少なく、主線から漸次分枝する 3 差路の路網形態を有することが多い。
- ③ 工作物や路体の施工をほとんど施さないため、2 点間を最短で結ぶ経路は少なく、迂回率は大きくなる。
- ④ 漸次分枝する分岐路は、集材けん引の関係上、直交の交差は少なく放射状に分岐する。したがって路網延長距離は長くなり路網配置係数も大きくなる。

集材路網の特徴を見る方法として大別し二つの方法が考えられる。一つは、伐区などの対象領域に対して路網がどのように配置されているかを見ようとするもので、対象領域に対する路線の分布状態あるいは路線の偏り程度を問題とするものである。これは対象地全体に対する路網導入計画に対し有効な指標となるもので、この指標の大小が集材機能を発揮するかどうかの大きな尺度となる。この指標による路網の分類を機能的分類と呼称した。これに対し、もう一つの路網の見方は、路網自身の路線構成の形態的特徴を見ようとするものであり、路網を構成するノード（連結点）とリンク（連結線）の係り合いの特性を問題とするものである。これはトラクタの集材サイクル（木寄せ、トラクタ走行、集材搬出、土場待ちなど）時間に直接関係するものであり、トラクタの集材工程の 1 サイクルの流れ（手順）や集材回数、トラクタ台数、セット人員の配置、土場数などを決定する際の指標となる。この指標による集材路網の分類を形態的分類と定義した。

これらの分類については、第 3～4 節において検討を行ったが、ここでは、まず集材路網を構成する各路線の幾何学的特徴について検討した。

線分によって構成される事象、例えば河川網、通信網、交通網、あるいは樹木や人体における導管や血管網は、それぞれその目的に応じて多様な形を構成するが、そこには常に一点から多点ある

いは多点から一点へ流動する形態をとっており、一つ一つの線分はそれぞれの目的に応じて構成されており、形態的にも機能的にも調和のとれたものとなっている。しかしともすると人為的に設けられる道路網などでは得てしてその構成に連続性が欠けるものも少なくなく、路網全体としてみると無作為の線分の組み合わせのようにもみえる。

ここでは、これらの路網を幾何学的観点から図 3 や次に示すような線分のいずれかまたはその組み合わせによって構成されていると考え、確率論の立場からそれぞれの線分についてその長さの期待値について検討した^{32)~41)}。

路網を構成する線分は次のとおりである。

- ① 対象区域の周囲上の既知点と対象区域内の任意の点を結ぶ線分。
- ② 対象区域の任意の周辺と対象区域内の任意点を結ぶ線分。
- ③ 対象区域内の任意の 2 点を結ぶ線分。
- ④ 対象区域を横切る任意の線分。

対象地を矩形とし、長辺 a 、短辺 b の矩形対象区域についてそれぞれの線分の平均距離の期待値について示すと以下のとおりである。

- (1) 対象区域の周囲上の既知点と対象区域内の任意の点までの平均距離

図 4 より、周辺の既知点を a 上の点 $P_1 (a_1 : a_2)$ とするとき、区域内の任意点 P_2 から P_1 への平均距離はそれぞれ分割区域 A_1, A_2 内の任意点 P_2 から頂点 P_1 への平均距離の期待値を平均化したものとなる。そこで、まず図 4 の (b) より矩形の頂点 $P_1 (x_1, y_1)$ と矩形内の任意点 $P_2 (x_2, y_2)$ の 2 点間の距離の期待値について算定すると式 (2.1) のとおりである^{9),10)}。

$$E(l) = \frac{a}{6} \left[2\sqrt{1+k^2} + k^2 \ln \frac{1+\sqrt{1+k^2}}{k} + \frac{1}{k} \ln(k + \sqrt{1+k^2}) \right]$$

$$\left(E(l) = \frac{a}{6} \left[2\sqrt{1+k^2} + k^2 \sinh^{-1} \frac{1}{k} + \frac{1}{k} \sinh^{-1} k \right] \right) \quad (2.1)$$

ただし、 $k=b/a$ ($0 < k \leq 1$)。

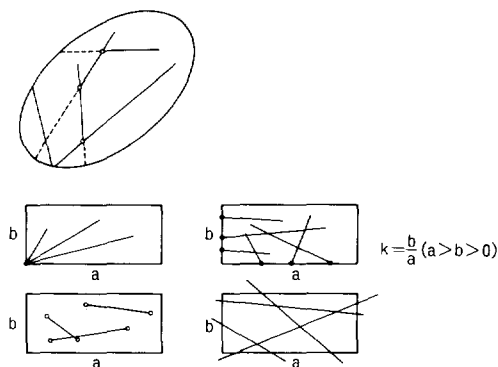


図 3. トラクタ集材路網の幾何学的構成

また、周辺上の点 P_1 が $(0, 0)$ のとき、区域内の任意点との平均距離は式 (2.1) で表されることから、点 P_1 が周辺上の一边 a 上を $a_1 : a_2$ と比で分ける点 $(a_1, 0)$ ($0 < a_1 \leq a$) にある場合、 $k_1 = \frac{b}{a_1}$, $k_2 = \frac{b}{a_2}$ とおくと、それぞれ区域 A_1, A_2 における平均距離の期待値 $E(l_1)$, $E(l_2)$ は式 (2.2) となり、任意点 P_2 が区域 A_1 および A_2 に含まれる確率すなわち面積比 $\left(\frac{a_1 b}{ab}, \frac{a_2 b}{ab}\right)$ を乗ずることにより、既知点 $P_1 (a_1, 0)$ と区域内の任意点 P_2 の平

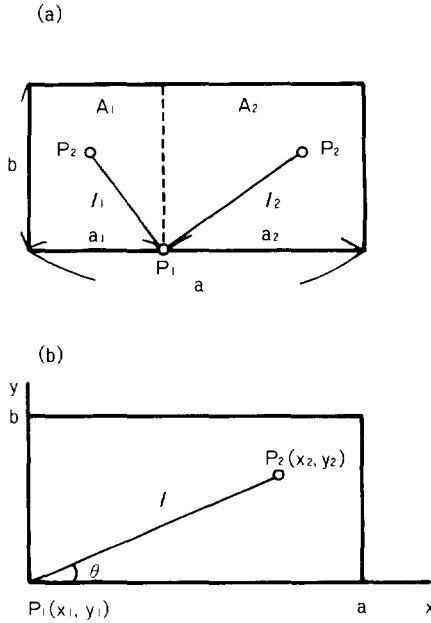


図 4. 周囲上の既知点と域内の任意点の平均距離

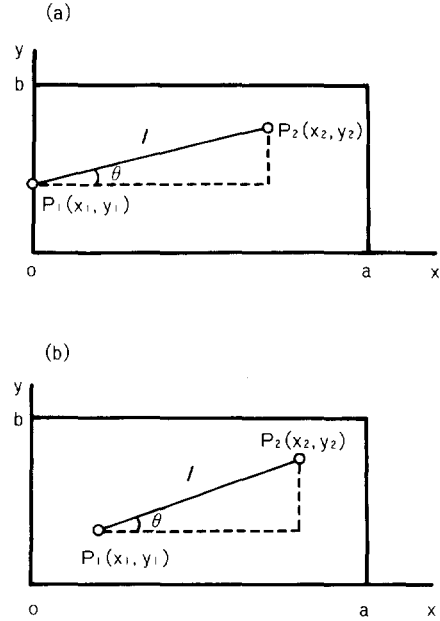


図 5. 周囲上の任意点と域内の任意点および域内の任意の2点間の平均距離

均距離の期待値 $E(l)$ が得られる。

$$\left. \begin{aligned} E(l_1) &= \frac{a_1}{6} \left[2\sqrt{1+k_1^2} + k_1^2 \sinh^{-1} \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_1} \sinh^{-1} k_1 \right] \\ E(l_2) &= \frac{a_2}{6} \left[2\sqrt{1+k_2^2} + k_2^2 \sinh^{-1} \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_2} \sinh^{-1} k_2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

$$E(l) = \frac{a_1}{a} E(l_1) + \frac{a_2}{a} E(l_2) \quad (2.3)$$

$a_1 = a_2$ のとき、 $E(l)$ は次式となる。

$$E(l) = \frac{a}{12} \left[\sqrt{4+k^2} + \frac{k^2}{4} \sinh^{-1} \frac{2}{k} + \frac{2}{k} \sinh^{-1} \frac{k}{2} \right] \quad (2.4)$$

(2) 対象区域の任意の周辺と対象区域内の任意の点までの平均距離

この線分は(1)の場合の周辺上の点がいかなる点にあろうと成り立つもので、区域内の点と同時に周辺上の点も動くモデルとなる。(1)の場合と同様、長辺と短辺をそれぞれ a , b とすると、周辺上の任意点は長辺 a 上および短辺 b 上にある場合ごとに平均距離の期待値が得られる。

(図. 5 (a))

それぞれ長辺および短辺上の任意点と区域内の任意点の平均距離の期待値を $E(l_a)$, $E(l_b)$ とすると、式 (2.5) により表される。

(長辺 a 上にある場合)

$$\left. \begin{aligned}
 E(l_a) &= \frac{b}{12} \left[(3-2k^2) \sqrt{1+\frac{1}{k^2}} + 2k^2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{k^2} \sinh^{-1} k + 4k \sinh^{-1} \frac{1}{k} \right] \\
 (\text{短辺 } b \text{ 上にある場合}) \\
 E(l_b) &= \frac{a}{12} \left[(3-\frac{2}{k^2}) \sqrt{1+k^2} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{2}{k^2} + k^2 \sinh^{-1} \frac{1}{k} + \frac{4}{k} \sinh^{-1} k \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

ただし, $k=b/a$ ($0 < k \leq 1$)。

そこで, 周辺上の任意点が長辺および短辺上にある確率をそれぞれ P_a, P_b とすると, 区域内の任意点と周辺上の任意点を結ぶ平均距離の期待値 $E(l)$ は式 (2.7) により与えられる。

$$\left. \begin{aligned}
 P_a &= \left[2 \left(\sqrt{a^2+b^2} - b \right) + 2 \left\{ (a+b) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \sqrt{a^2+b^2} \right\} \right] / 2(a+b) = \frac{a}{a+b} \\
 P_b &= \left[2 \left(\sqrt{a^2+b^2} - a \right) + 2 \left\{ (a+b) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \sqrt{a^2+b^2} \right\} \right] / 2(a+b) = \frac{b}{a+b} \\
 \therefore E(l) &= \frac{a}{a+b} E(l_a) + \frac{b}{a+b} E(l_b)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\therefore E(l) = \frac{a}{a+b} E(l_a) + \frac{b}{a+b} E(l_b) \quad (2.7)$$

式 (2.5) の右辺のそれぞれの a および b を除いた部分は, 対象区域の形状によって変るパラメータであるから, それぞれの部分 K_a, K_b と置き, その平均を K とすると式 (2.7) は次式となる。

$$E(l) = \frac{ab}{a+b} (K_a + K_b) = \frac{2ab}{a+b} \cdot K = \frac{4KA}{L_s} \quad (2.8)$$

ただし, A : 対象区域の面積, L_s : 対象区域の周長。

つまり, 対象区域内の任意点と周辺上の任意点間の平均距離の期待値は対象区域の面積と周長およびその形状によって算定できることになる。

(3) 対象区域内の任意の 2 点間の平均距離

(1), (2) と同様, 対象区域内の任意の 2 点間の距離の確率密度関数からその平均距離の期待値を算定すると式 (2.9) を得る³⁹⁾。(図. 5 (b))

$$E(l) = \frac{1}{30k^2} \left[2(1+k^5) - 2 \left\{ (1-k^2)^2 - k^2 \right\} \sqrt{1+k^2} \right. \\
 \left. + 5k \sinh^{-1} k + 5k^4 \sinh^{-1} \frac{1}{k} \right] \quad (2.9)$$

ただし, $k=b/a$ ($0 < k \leq 1$) である。

また, $E(l^2)$ は次式で与えられる。

$$E(l^2) = \frac{a^2}{6}(1+k^2) \quad (2.10)$$

(4) 対象区域を横切る任意の線の対象区域内の平均距離

対象区域に任意に引いた直線の区域内での平均距離の期待値は乱線の定義^{32)~41)}から求めることができる。

任意の区域に対し横切る直線の区域内の長さ l の期待値 $E(l)$ は、直線が区域の任意の点を横切るときの測度 $m(x_0)$ と全体の測度 $m(x)$ により求められる。(図. 6 (a), (b))

そこで、区域の面積を A 、周表を L_s とすると期待値 $E(l)$ は、

$$E(l) = m(x_0)/m(x) = \pi A/L_s \quad (2.11)$$

となり、対象区域を矩形とし、それぞれ長辺、短辺を a, b とすると、対象区域を横切る直線の区域内の平均距離の期待値 $E(l)$ は

$$E(l) = \frac{\pi ab}{2(a+b)} = \frac{\pi a}{2} \cdot \frac{k}{(1+k)} \quad (2.12)$$

となる。

以上のように、集材路網を構成するそれぞれの線分の平均距離の期待値は確率論の立場から理論的に算定することができ、同一の対象面積でも対象区域の形状によって変わることがわかる。

図 7 および表 2 は、対象区域を矩形とし、長辺の長さ a を 1 とした場合の対象区域の形状指数 $k(k = b/a \ (0 < k \leq 1))$ すなわち矩形の短辺と長辺の比と各線分の平均距離の期待値 $E(l)$ の関係を示したものである。表および図から、各線分の

平均距離の期待値 $E(l)$ は、形状指数 k が 1 (正方形) になるにしたがって大きくなり、細長い形状 ($k \rightarrow 0$) になるほど小さくなる。しかし対象区域の形状の違いによる平均距離の期待値 $E(l)$ の変化は対象区域を横切る線分以外の線分ではそれほど大きいものではないことがわかる。

一般的な伐区形状として第 IV 章の想定伐区モデル $k=0.5$ ($a=200$ m, $b=100$ m) について、それぞれの線分の平均距離を算定すると次のとおりである。

- ① 118.6 m (既知点：矩形の 4 隅), 76.5 m (長辺の中央), 106.1 m (短辺の中央)。
- ② 110.3 m (短辺上の任意点), 90.9 m (長辺上の任意点), 97.4 m (周辺上の任意点)。
- ③ 80.5 m (対象区域内の任意の 2 点)
- ④ 104.7 m (対象区域を横切る任意の線分)

以上のように、集材作業に大きく関与する集材距

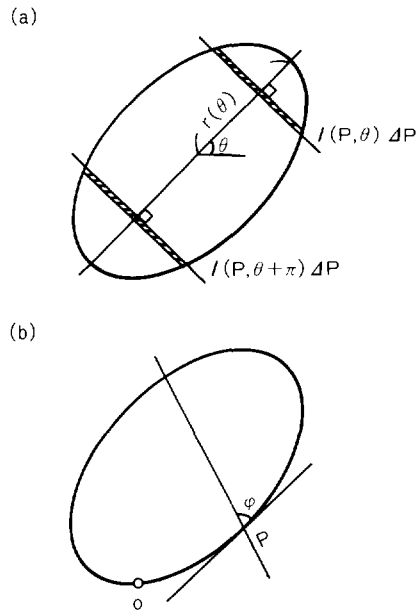


図 6. 域内を横切る線分の域内の平均距離

離あるいは木寄せ距離は、伐区形状がわかればこれらの線分の期待値から推定が可能となり、集材路網計画の際の指標となる。

第3節 集材路網の機能的分類

3.1 集材路網モデルと集材路網配置指標

任意の対象面域に対して集材路網がどのように分布し配置しているかについては、LÜNZMANN,

K.⁴²⁾ の開発指数や SEGBADEN, G. ら^{43), 44)}

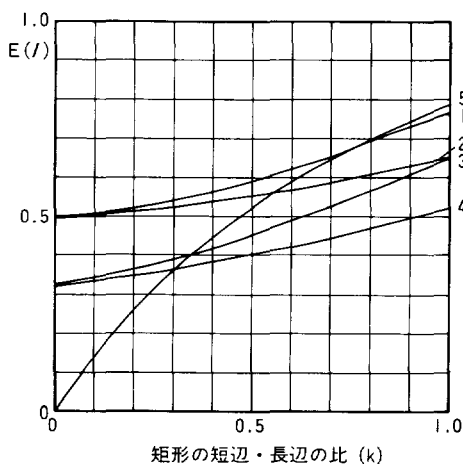
の路網密度補正係数あるいは SAMSET, I.⁸⁾

や堀ら⁴⁵⁾ の路線配置係数に示されるように式 (2.13) により表される。

$$f = \frac{D \cdot \bar{r}}{(1 + \eta)} \times 4 \quad (2.13)$$

ただし、 D : 集材路網密度 (m/m^2)、 $\bar{r}$: 平均到達距離 (平均木寄せ距離) (m)、 η : 集材路の迂回率。

つまり、この指標は、集材路線の偏りの程度を示すもので、集材路網の配置の偏りや重複による集材機能効果に対する無駄の程度を示すものとして表現できる。この指標は集材路網がランダムに導入された場合を中心に、一方では偏りが小さい均一ないし均等に導入された集材路網、他方では偏りの大きい集塊状に導入された集材路網に対する路網パター



- 1 対象区域内の任意の一点から周辺の既知点
- 2 対象区域内の任意点から周辺 (短辺)
- 3 対象区域内の任意点から周辺 (長辺)
- 4 対象区域内の任意の2点
- 5 対象区域を横切る線

図 7. 伐区形状と各種線分の平均距離の期待値

表 2. 伐区形状と集材路網を構成する各線分の平均距離の期待値

矩形の短辺・ 長辺の比 k	既 知 数 と 任意の点間	対象区域内の任意点と周辺の点間		対象区域内の 任意の2点間	対象区域を 横 切 る 線
		矩形の短辺	矩形の長辺		
0	—	—	—	—	0
0.1	0.5063	0.5031	0.3446	0.3384	0.1428
0.2	0.5209	0.5113	0.3682	0.3498	0.2618
0.3	0.5411	0.5225	0.3896	0.3648	0.3625
0.4	0.5654	0.5360	0.4203	0.3825	0.4489
0.5	0.5932	0.5517	0.4543	0.4024	0.5237
0.6	0.6239	0.5692	0.4906	0.4239	0.5891
0.7	0.6569	0.5882	0.5289	0.4468	0.6469
0.8	0.6913	0.6082	0.5687	0.4708	0.6982
0.9	0.7306	0.6295	0.6097	0.4963	0.7442
1.0	0.7652	0.6518	0.6518	0.5214	0.7854

・注) k : 伐区形状を矩形とした場合の短辺・長辺の比 (各期待値は長辺の長さ1とした値である)

ンの判定に有効なものとなる。そこで集材路網が任意の対象区域にランダムに導入された場合を中心にこの指標の範囲について検討した。

なお、この指標を以後 f 値と呼ぶことにした。

まず任意の対象区域（面積 A 、周長 L_s ）にランダムに導入された路網についてその f 値を確率的に算定した。

対象区域にランダムに引いた m 本の路線の路網密度は次のとおりである。

m 本のランダムな路線の対象区域内の交点の期待値 $E(n)$ は乱線の定義^{32)~41)} から式 (2.14) で与えられる。

$$E(n) = m C_2 \frac{2\pi A}{L_s^2} \quad (2.14)$$

そこで路線数の推定値 $\hat{m}$ は、路線の交点数 n とすると次のとおりになる。

$$\hat{m}(\hat{m}-1) = \frac{L_s^2}{\pi A} \cdot n \quad (2.15)$$

$$(\hat{m}-1)^2 < \hat{m}(\hat{m}-1) < \hat{m}^2 \quad (2.16)$$

$$L_s \sqrt{\frac{n}{\pi A}} < \hat{m} < L_s \sqrt{\frac{n}{\pi A}} + 1 \quad (2.17)$$

ゆえに路線の対象区域内の長さの総延長距離を Δ とすると Δ は路線一本当たりの平均長 $\times$ 路線数であるから、式 (2.11) から路線の一本当たりの長さの期待値 $\frac{\pi A}{L_s}$ を代入すると、式 (2.18) となる。式 (2.18) を式 (2.17) に代入することにより Δ の推定式 (2.19) が求まる。

$$\Delta = \hat{m} \cdot \frac{\pi A}{L_s} \quad (2.18)$$

$$\therefore \Delta \div \sqrt{n\pi A} \quad (2.19)$$

さらに路網密度 D は、単位面積当たりの路線どうしの交点数（路網交点密度）を ρ とすると式 (2.20) となる。

$$D = \Delta / A = \sqrt{n\pi A} / A = \sqrt{\rho\pi} \quad (2.20)$$

次に、路線の交点間隔から平均到達距離を算定する。

いま、対象区域内の任意の点において dl の線分にランダムに引いた線が交わる確率は $\frac{2dl}{L_s}$ であり、 m 本のランダムな路線に対し、 dl と交わる交点数の期待値を $E(N)$ とすると、式 (2.21) となり、式 (2.18) を代入して式 (2.22) を得る。

$$E(N) = m \cdot \frac{2dl}{L_s} \quad (2.21)$$

$$E(N) = \frac{2\Delta dl}{\pi A} \quad (2.22)$$

式 (2.22) の両辺を dl で割れば、交点数の密度 λ （単位距離当たり交点数）の期待値 $E(\lambda)$ が求まり、式 (2.20) を代入することにより式 (2.23) を得ることができる。

$$E(\lambda) = \frac{2\Delta}{\pi A} = \frac{2\sqrt{n\pi A}}{\pi A} = 2\sqrt{\frac{\rho}{\pi}} \quad (2.23)$$

さらに、交点間の分布は単位長さ当たりの交点数がポアソン分布に従うことから、その交点間隔は指数分布となり^{46),47)}、式 (2.25) から平均交点間隔 $E(L)$ は式 (2.23) を代入することにより式 (2.26) で与えられる。

$$P_k(l) = \frac{(\lambda l)^k e^{-\lambda l}}{k!} \quad (2.24)$$

$$f(l) = \lambda e^{-\lambda l} \quad (2.25)$$

$$E(l) = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi A}{n}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\rho}} \quad (2.26)$$

ゆえに交点間隔の平均は式 (2.26) となり、平均到達距離は図 8 より $\sqrt{n}/8\sqrt{\rho}$ となる。したがって f 値は式 (2.20) および $\sqrt{n}/8\sqrt{\rho}$ を式 (2.13) に代入することにより次式のとおき求めることができる。

$$f = \sqrt{\rho\pi} \times \frac{\sqrt{\pi}}{8\sqrt{\rho}} \times 4 = \frac{\pi}{2} \quad (2.27)$$

すなわち、ランダムに導入された路網の f 値は $\pi/2$ (1.571) となり、それより小さい値になるにしたがって均一型路網、大きい値になるにしたがって集塊型路網となることがわかった。

ただし、この f 値は図 8 からわかるように、集材領域を囲む路線のうち、左右の 2 路線に集材する場合であり、所謂、3 差路路網の f 値である。一般的なランダムラインの f 値は 2 となる⁴³⁾。

図 9 は、路網モデルと f 値の関係を示したものであるが一般に対象区域が矩形で路線が対象区域を横切る場合の f 値は 1~2.667 の範囲となり、路線が均一に導入された路網の場合の f 値は 1 となり、偏りが最も大きい集塊路網では f 値は 2.667 となり、ランダムに導入された路網では f 値は $\pi/2 \sim 2$ となることがわかる。

各種の路網モデルから、特に格子状および放射状に無限に路網が導入された場合と対象区域の中途まで路線が導入された場合の f 値についてさらに検討を行った⁴⁸⁾。

(1) 格子状に路網が無限に導入された場合

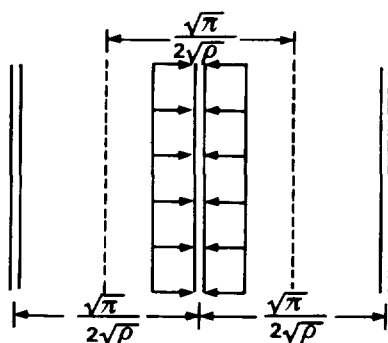


図 8. ランダムラインの交点間隔と平均到達距離

図 10 から路網が格子状に均一に導入された場合、矩形の一辺を a 、格子間隔を ε とすると、 a 上の格子数 n は $\frac{a}{\varepsilon}$ となり、路線数は $2(n-1)$ となる。各格子内の路線までの平均到達距離は図のように路線に対して 4 つの場合があり、それぞれ平均到達距離 ($\bar{r}_1 \sim \bar{r}_4$) および面積 ($A_1 \sim A_4$) は次のとおりである。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{① } \bar{r}_1 = \frac{a}{3n}, & A_1 = 4\left(\frac{a}{n}\right)^2 \\ \text{② } \bar{r}_2 = \frac{a}{4n}, & A_2 = 2(n-2)\left(\frac{a}{n}\right)^2 \end{array} \right\}$$

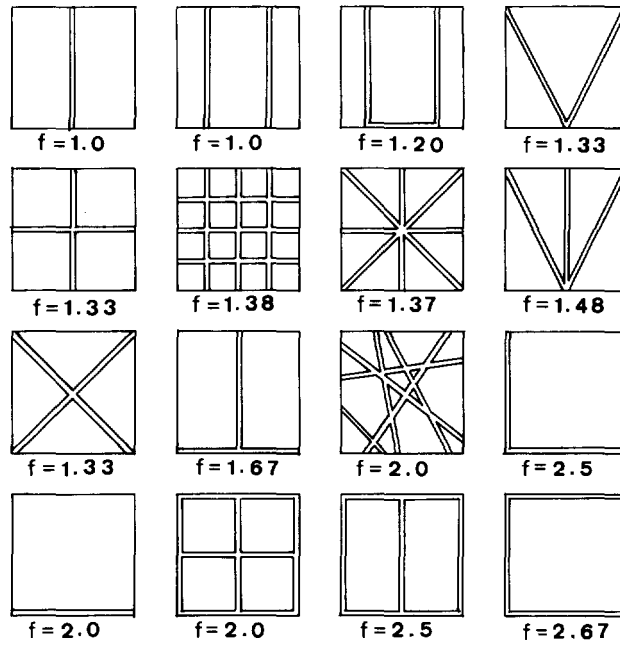
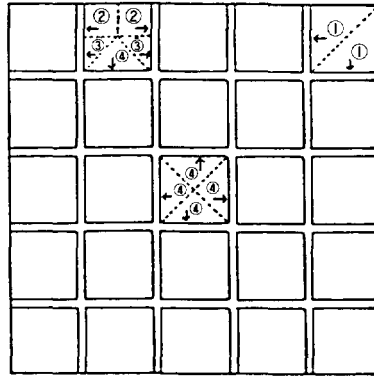
図 9. 集材路網モデルと f 値

図 10. 格子状路網の平均到達距離

$$\left. \begin{aligned} \textcircled{3} \quad \bar{r}_3 &= \frac{a}{6n}, \quad A_3 = (n-2) \left(\frac{a}{n} \right)^2 \\ \textcircled{4} \quad \bar{r}_4 &= \frac{a}{6n}, \quad A_4 = (n-1)(n-2) \left(\frac{a}{n} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

全体の平均到達距離 $\bar{r}$ は式 (2.29) で表される。

$$\bar{r} = \frac{1}{a^2} \left\{ \frac{a}{3n} \times 4 + \frac{a}{4n} \times 2(n-2) + \frac{a}{6n} \times (n-2) + \frac{a}{6n} \times (n-1)(n-2) \right\} \left(\frac{a}{n} \right)^2 = \frac{1}{6a^2} \left(\frac{a}{n} \right)^3 (n^2 + n + 2) \quad (2.29)$$

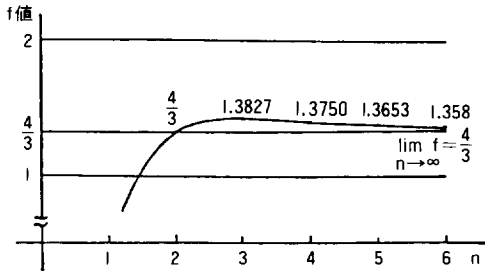


図 11. 格子路線数と f 値

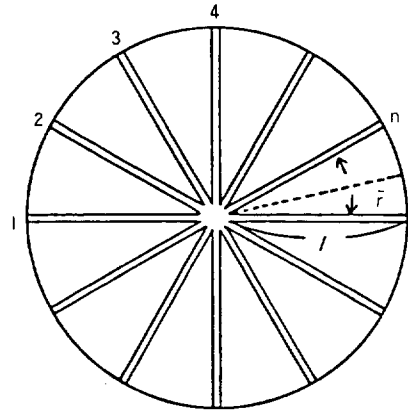


図 12. 放射状路網の平均到達距離

また、路網密度 D は、 $\frac{2(n-1)}{a}$ となり、 f 値は式 (2.30) で与えられる。

$$f = \frac{4}{3} \frac{(n-1)(n^2+n+2)}{n^3} \quad (2.30)$$

すなわち、 f 値は n の関数となり、 f 値を最大にする n は式 (2.30) より次のとおりである。

$$\begin{aligned} \frac{df}{dn} &= 0 \text{ より} \\ \frac{8}{3} \left(\frac{n-3}{n^4} \right) &= 0 \quad \therefore \quad n = 3 \end{aligned} \quad (2.31)$$

図 11 および式 (2.31) から、 f 値は $n=3$ (路線数 4) のとき最大となり、最大値は 1.383 となり $n \rightarrow \infty$ に対して f 値は $\frac{4}{3}$ に漸近する。要するに、格子状に導入される路網は $n=3$ のとき最大となり、路線数がそれ以上多く導入されても f 値はほとんど変わらず、 $4/3 \sim 1.383$ の範囲となることがわかった。

(2) 放射状に路網が無限に導入された場合

路線が均等に放射状に導入される場合、簡単にするために対象区域を円とし、半径 l の円対象区域に n 本の路線が導入された場合を考える。図 12 より各路線により分割された扇形部分の分坦面積 A_i (扇形面積の $\frac{1}{2}$) および平均到達距離 $\bar{r}$ は式 (2.32)、(2.33) で与えられる。

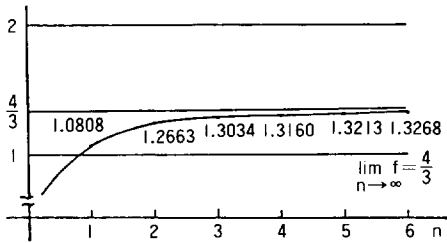
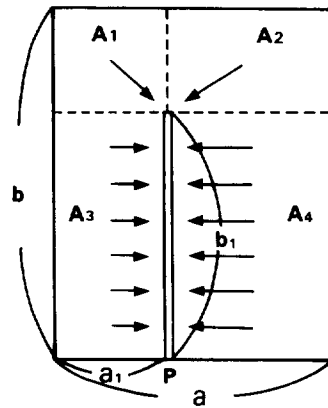
$$A_i = \pi l^2 / 4n \quad (2.32)$$

$$\bar{r} = \int_0^{\frac{\pi}{2n}} \int_0^l l_i^2 \sin \theta \, dl_i \, d\theta / A_i = \frac{4nl}{3\pi} \left(1 - \cos \frac{\pi}{2n} \right) \quad (2.33)$$

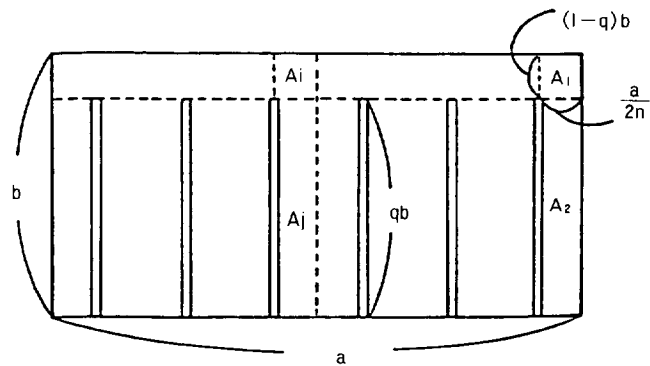
また、路網密度 D は、 $\frac{2n}{\pi l}$ となり、 f 値は

$$f = \frac{32n^2}{3\pi^2} \left(1 - \cos \frac{\pi}{2n} \right) \quad (2.34)$$

となる。 f 値は n の関数となり、 n について微分すると、次式となる。

図 13. 放射路線数と f 値図 14. 域内の中途まで導入された
路線の平均到達距離表 3. k_1 (または k_2)
と μ の関係

k_1 (または k_2)	μ
0.1	0.921
0.2	0.868
0.3	0.832
0.4	0.808
0.5	0.791
0.6	0.780
0.7	0.773
0.8	0.768
0.9	0.769
1.0	0.765

図 15. 域内の中途まで n 本の路線が導入された場合の平均到達距離

$$\frac{df}{dn} = \frac{32}{3\pi^2} \left\{ 2n \left(1 - \cos \frac{\pi}{2n} \right) - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2n} \right\} \quad (2.35)$$

すなわち、 f 値は n による単調増加の関数となり $n \rightarrow \infty$ に対し $\frac{4}{3}$ に漸近することがわかる。図 13 からわかるように放射状に導入された路網の f 値は n の増大に対し $\frac{4}{3}$ を越えない値をとることがわかった。

(3) 路線が対象区域の中途まで導入された場合

対象区域の中途まで路線が導入される場合として図 14 のような矩形領域に対してどこまで導入された場合に f 値が最小となるかについて検討した。いま矩形の各辺 a, b に対し、辺 a の任意

の点 P から辺 b に平行に路線が導入された場合を考えると、図14より点 P ($a_1, 0$) より路線 b_1 を導入した場合、 a_1 および b_1 をそれぞれ $a_1 = ma$, $b_1 = qb$ とおくと、分割された面積 ($A_1 \sim A_4$) およびその平均到達距離 ($\bar{r}_1 \sim \bar{r}_4$) は、式 (2.36) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_1 &= ma \left[\frac{1}{6} \left(2\sqrt{1+k_1^2} + k_1^2 \sinh^{-1} \frac{1}{k_1} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{k_1} \sinh^{-1} k_1 \right) \right] \quad , \quad A_1 = m(1-q)ab \\ \bar{r}_2 &= (1-m)a \left[\frac{1}{6} \left(2\sqrt{1+k_2^2} + k_2^2 \sinh^{-1} \frac{1}{k_2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{k_2} \sinh^{-1} k_2 \right) \right] \quad , \quad A_2 = (1-m)(1-q)ab \\ \bar{r}_3 &= \frac{ma}{2} \quad , \quad A_3 = m q ab \\ \bar{r}_4 &= \frac{(1-m)a}{2} \quad , \quad A_4 = (1-m) q ab \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

ただし、 $k_1 = \frac{(1-q)b}{ma}$, $k_2 = \frac{(1-q)b}{(1-m)a}$ 。

ここで $\bar{r}_1$ および $\bar{r}_2$ の右辺のカッコ内は表2や図7に示すとおり矩形の短辺・長辺の比によって変わることから、それぞれカッコ内の値を K_1, K_2 とおき、 $\mu = 2K_1/(1+k_1)$ および $\mu = 2K_2/(1+k_2)$ とおくと、 μ は表3に示すように k_1 または k_2 の変化に対しほとんど変らない値となる。したがって μ を一定とみなし、式 (2.36) に代入すると、 $\bar{r}_1, \bar{r}_2$ は次式 (2.37) のとおりになる²³⁾。

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_1 &= \frac{ma(1+k_1)}{2} \cdot \mu \\ \bar{r}_2 &= \frac{(1-m)a(1+k_2)}{2} \cdot \mu \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

ゆえに全体の平均到達距離 $\bar{r}$ および f 値は

$$\bar{r} = \frac{1}{2} \left[a \left\{ (1-q)\mu + q \right\} (2m^2 - 2m + 1) + (1-q)^2 b \mu \right] \quad (2.38)$$

$$f = \frac{2q}{a} \left[a \left\{ (1-q)\mu + q \right\} (2m^2 - 2m + 1) + (1-q)^2 b \mu \right] \quad (2.39)$$

となり、 f 値は m と q の関数となる。まず m について f 値を最小にする m を算定すると

$$\begin{aligned} \frac{df}{dm} &= 0 \text{ より} \\ \therefore m &= \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (2.40)$$

となる。つまり、矩形の真中に路線を導入するとき f 値は最小となる。

そこで、路線の導入比率 q について、図15のように n 本の路線が均一の間隔で導入された場合についてみる。

各分割された面積 A_i および A_j はそれぞれ $\frac{(1-q)ab}{2n}$, $\frac{qab}{2n}$ であり、平均到達距離 $\bar{r}$ は

$$\bar{r} = \frac{1}{4n} \left[aq + (1-q) \left\{ a + 2(1-q)bn \right\} \mu \right] \quad (2.41)$$

となる。路線密度は $\frac{nqb}{ab}$ であるから、 $k = \frac{b}{a}$ とおくと、 f 値は式 (2.42) で表される。

$$f = 2q \left[kn\mu q^2 + \frac{q}{2} \left\{ 1 - \mu(1+4kn) \right\} + \frac{\mu}{2} (1+2kn) \right] \quad (2.42)$$

式 (2.42) に $n=1$ を代入すると $m = \frac{1}{2}$ の式となることがわかる。そこで f 値を最小にする q を求めると、 $\frac{df}{dq} = 0$ より、式 (2.43) を得る。

$$6kn\mu q^2 + 2 \left\{ 1 - (1+4kn)\mu \right\} q + (1+2kn)\mu = 0$$

$$\therefore q = \frac{\{(1+4kn)\mu - 1\} \pm \sqrt{E}}{6kn\mu} \quad (2.43)$$

ただし、 $E = (1+2kn+4k^2n^2)\mu^2 - 2(1+4k)\mu + 1$ である。

E は k や μ に対しきわめて小さいので $E=0$ として q の近似値を求める。ここで $k=1$ 、 $\mu=0.8$ とすると、 q は

$$q = \frac{(1+4kn)\mu - 1}{6kn\mu} = \frac{2}{3} - \frac{1}{24n} \quad (2.44)$$

となる。すなわち路線数 $n=1$ のとき $q=0.625$ となり、路線数 n を多くすると $\frac{2}{3}$ となる。矩形の辺 b のほぼ $\frac{2}{3}$ まで導入したとき f 値は最小となることがわかる。したがって式 (2.42) に $q = \frac{2}{3}$ を代入すると、 f 値は

$$f = \frac{4}{27} (0.8n + 4.2) \quad (2.45)$$

となり、 f 値は 0.7407 となる。

また、平均到達距離 $\bar{r}$ が最小になる路線の導入比率 q は、式 (2.41) から

$$q = 1 - \frac{1-\mu}{4k\mu} \quad (2.46)$$

となることから、 $k=1$ 、 $\mu=0.8$ 、 $n=1$ を代入すると、 q は 0.9375 となり、その f 値は 0.9316 となる。

表 4 は、それぞれ矩形の短辺・長辺の比 k と路線数 n を変えた場合の平均到達距離を最小にする路線の導入比率 q と f 値を示したものである。ただし、 μ は 0.8 である。表から明らかとなお、集材路網の配置指標すなわち f 値は、対象区域を横切の場合は 1 以上となるが対象区域の中途まで路線が導入される場合は 1 以下となることもあり、 f 値を最も小さくするためには対象区域の中央をとおり、最奥点までの距離のほぼ $\frac{2}{3}$ の地点まで導入した場合となることがわかった。

3.2 対象区域内の到達距離の分布関数

対象区域内に導入された路線に対して、対象区域内の各点からその路線までの至近距離を到達距離として、パラメータ R で与えると対象区域に対する路線の配置モデルによって異なるが、その到達距離の密度関数は一般に式 (2.47) で表される。(図 16 (a), (b))

$$f(t) = a(1-bt)^c \quad (2.47)$$

ただし, $t=R/\bar{r}$, $\bar{r}$: 平均到達距離である。

a, b, c は, 対象区域と路線の配置モデルによって決まる係数であるが, 図 16 (c) より, 平均 $\bar{x}$ が 1 の密度関数を考えると各係数間に次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} a &= b\left(\frac{1}{b}-1\right) \\ c &= \frac{1}{b}-2 \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

表 4. 対象伐区の中途まで導入する場合の平均木寄せ距離を最小にする導入比率 (q 値) とその集材路網の配置指標 (f 値)
路線の導入比率 (q 値)

矩形の短辺・長 辺の比	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 10	n = 15
0.2	0.6659	0.8305	0.8865	0.9147	0.9315	0.9657	0.9772
0.4	0.8305	0.9147	0.9430	0.9572	0.9657	0.9828	0.9886
0.5	0.8642	0.9315	0.9542	0.9657	0.9727	0.9861	0.9909
0.6	0.8865	0.9418	0.9620	0.9715	0.9772	0.9886	0.9925
0.8	0.9147	0.9572	0.9715	0.9785	0.9828	0.9914	0.9942
1.0	0.9315	0.9657	0.9772	0.9828	0.9861	0.9932	0.9954

集材路網の配置指標 (f 値)

矩形の短辺・長 辺の比	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4	n = 5	n = 10	n = 15
0.2	0.6875	0.8438	0.8958	0.9219	0.9375	0.9688	0.9792
0.4	0.8438	0.9219	0.9479	0.9609	0.9688	0.9844	0.9896
0.5	0.8750	0.9375	0.9583	0.9688	0.9750	0.9875	0.9917
0.6	0.8958	0.9479	0.9653	0.9740	0.9792	0.9896	0.9931
0.8	0.9219	0.9609	0.9740	0.9805	0.9844	0.9922	0.9948
1.0	0.9375	0.9688	0.9792	0.9844	0.9875	0.9938	0.9958

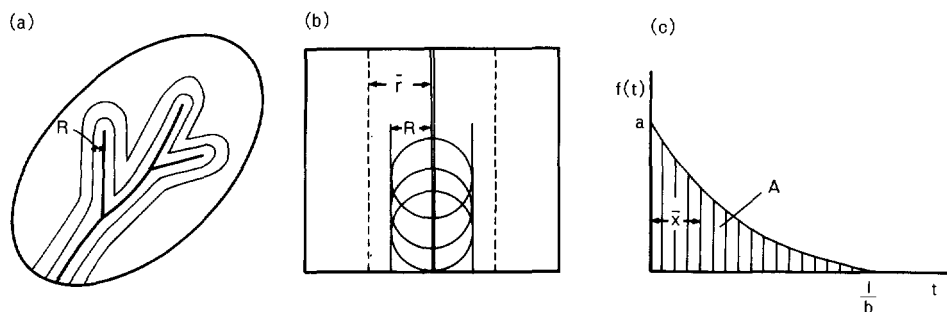


図 16. 到達距離の密度関数の算定

ここで到達距離の最大値に対する平均 ($\bar{x}$) の比を z とすると, $z = \frac{1}{b}$ より, パラメータ z に対する到達距離の密度関数は式 (2.49) で与えられる。

$$f(t) = \frac{z-1}{z} \left(1 - \frac{t}{z}\right)^{z-2} \quad (2.49)$$

そこで, 式 (2.49) を積分すると到達距離の分布関数が求まる。

$$F(t) = 1 - \left(1 - \frac{t}{z}\right)^{z-1} \quad (2.50)$$

すなわち, 式 (2.50) は堀ら⁴⁵⁾ によって示された一般式となる。そこで路線は真中に導入されるので, その f 値は式 (2.13) より次式 (2.51) で表される。

$$\begin{aligned} f &= \text{平均到達距離} \times \frac{\text{路線長}}{(2 \times \text{面積})} \times 4 \\ &= 1 \times \left(\frac{z-1}{z} / 2 \times 1\right) \times 4 = 2 \cdot \frac{z-1}{z} \end{aligned} \quad (2.51)$$

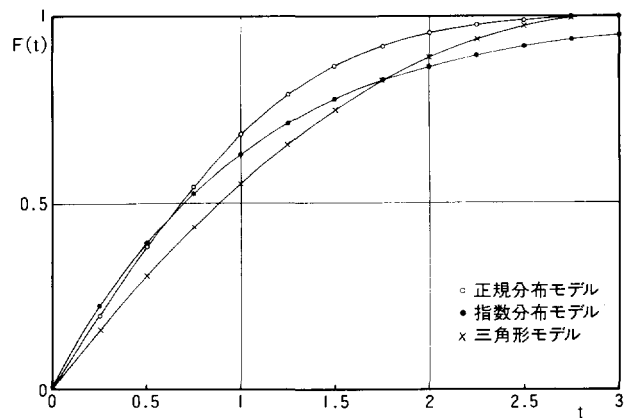
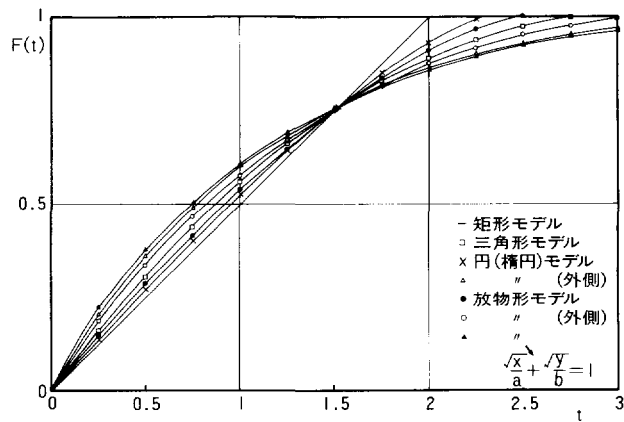


図 17. 理論モデルの到達距離の分布関数

表 5 理論モデルと到達距離の分布関数

モデル		密度関数 $f(t)$ 分布関数 $F(t)$	面積	平均集材 距離	最大到達 距離	f 値	図 示
矩形モデル (一様分布)		$f(t) = \frac{1}{2}$ $F(t) = 1 - (1 - \frac{t}{2})$	ab	$\frac{b}{2}$	b	1.0	
三角形モデル		$f(t) = \frac{2}{3}(1 - \frac{t}{3})$ $F(t) = 1 - (1 - \frac{t}{3})^2$	$\frac{ab}{2}$	$\frac{b}{3}$	b	$\frac{4}{3}$	
円 (楕円) モデル	内 側	$f(t) = \frac{4k}{\pi} \sqrt{1 - (kt)^2}$ $F(t) = \frac{2}{\pi} [kt \sqrt{1 - (kt)^2} + \sin^{-1}(kt)]$ $k = \frac{4}{3\pi}$	$\frac{\pi ab}{4}$	$\frac{4b}{3\pi}$	b	$\frac{32}{3\pi^2}$ (≈ 1.0808)	
	外 側	$f(t) = \frac{4k}{4-\pi} [1 - \sqrt{1 - (1-kt)^2}]$ $k = (1 - \frac{2}{3(4-\pi)})$ $F(t) = \frac{4}{4-\pi} [kt + \frac{1}{2}(1-kt)\sqrt{1 - (1-kt)^2} + \frac{1}{2}\sin^{-1}(1-kt) - \frac{\pi}{4}]$	$ab(1 - \frac{\pi}{4})$	$b(1 - \frac{2}{3(4-\pi)})$	b	$\frac{8(10-3\pi)}{3(4-\pi)^2}$ (≈ 2.0817)	
放物形モデル	内 側	$f(t) = \frac{3}{5}\sqrt{1-kt}$ $k = \frac{2}{5}$ $F(t) = 1 - \sqrt{1-kt}$	$\frac{2b\sqrt{b}}{3a}$	$\frac{2b}{5a}$	$\frac{b}{a}$	1.2	
	外 側	$f(t) = 3k(1 - \sqrt{kt})$ $k = \frac{3}{10}$ $F(t) = 1 - \{1 - kt(3 - 2\sqrt{kt})\}$	$\frac{b\sqrt{b}}{3a}$	$\frac{3b}{10a}$	$\frac{b}{a}$	1.8	
	特 殊	$f(t) = \frac{6}{5}(1 - 2\sqrt{kt} + kt)$ $k = \frac{1}{5}$ $F(t) = 1 - [1 - kt\{\frac{2}{3} + 3(\frac{4}{3} - \sqrt{kt})^2\}]$	$\frac{ab}{6}$	$\frac{b}{5}$	a	2.5	
指数分布 モデル		$f(t) = p \ell^{-qt}$ $F(t) = 1 - \ell^{-t}$	$\frac{p}{q}$	$\frac{1}{q}$	∞	2.0	
正規分布 モデル		$f(t) = p^2 \ell^{-(qt)^2}$ $F(t) = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \ell^{-(qx)^2} dx$	$\frac{\sqrt{\pi} p^2}{2q}$	$\frac{p}{8\sqrt{\pi}}$	∞	$\frac{4}{\pi}$	

表5は、代表的モデルの到達距離の分布関数および f 値を示したものである。また図17はその分布関数を図示したものである。図から各モデルの到達距離の分布関数は、矩形、三角形、円形などの凸領域を有するモデルから、双曲形や放物形などの凹領域を有するモデルになるにしたがって直線的増加傾向から対数的増加傾向になるが、各モデルに大差はなく、式(2.50)により一般化することができることがわかる。また各モデルの f 値は表5からわかるように、分布関数が直線的増加傾向を示すモデルほど小さく、対数的増加傾向のモデルほど大きい。言い換えると、矩形モデルでは f 値は1、三角形モデルでは $\frac{4}{3}$ となり、放物形モデル（特殊形）では2.5となることがわかる。

一般的な集材路網に対する到達距離の分布関数に対して z の値を推定すると、路網がランダムに導入された場合の f 値は $\frac{\pi}{2}$ であるから、式(2.51)から、 z は $\frac{1}{(1-\frac{\pi}{4})}$ となり、 z はほぼ整数値4~5となる。

つまり、対象区域に一般的な集材路網を導入した場合、木寄せ幅をパラメータ R で与えると、 $F(t)$ は全面域に対する集材可能な面積あるいは全伐倒木に対する集材可能な伐倒木数の割合となり、これを集材率 τ ($0 < \tau \leq 1$)で与えると平均到達距離 $\bar{r}$ と R には次の関係が成り立つ。すなわち式(2.50)より、 $z=4$ および $t=\frac{R}{\bar{r}}$ を代入すると、

$$\bar{r} = \frac{R}{4(1-\sqrt[3]{1-\tau})} \quad (2.52)$$

となる。これらの集材率と木寄せ幅などの関係については次章でさらに検討する。

第4節 集材路網の形態的分類

ここでいう形態的分類は集材路網の形態的特性を表示するものである。言い換えれば路網を構成する連結点と連結線のかかわり合いの特性を問題とするのであるが所謂グラフ理論というフローを主体とする抽象化した連結関係だけを表示するのではなく、ノードの位置やリンクの通過位置なども考慮した形態を分類するものである。

一般道における形態的分類による名称には格子網、放射網、循環網など多く分類名が示されているが^{49)~51)}、集材路網の形態は集材という単一目的道の性格から、土場や既設道を基点とする突込み型タイプの形態が多く、一般道の路網形態と比べるとより単純なものと見える。集材路網の形態的分類に関する報告として、ADAMOVICH, L.⁵²⁾は集材路網タイプには大別してランダム路網と幾何学的配列路網があり、後者には平行型や扇状形の変形タイプの路網あるいは中継土場を持つ多工程輸送タイプさらに機械化された伐出作業に適するループ状の路網などを例示しているが集材路網に対するタイプ分けについて、このほかに系統的に分類した報告はきわめて少ない²²⁾。

本節では、集材路網の形態特性を乱線を用いて分類する方法について検討した。

4.1 形態的分類指標の算定

集材路網とそれを覆う乱線との交点に関し、乱線上に沿った交点の分布状態から集材路網の形態を分類しようとするものである。

ここでは最近接点どうしの対をなす点の期待値を指標として路網形態の相違を明らかにした。

ランダムに導入された路網に対し、任意の直線をその上に引くと、路網と直線の交点は直線上にランダムに配列することになる。そこでランダムに配列された点分布に対し、互いに近接な対をなす点の期待値を計算する。

いま、直線上のランダムな点分布に対し、距離 r だけ離れた二つの点を I_1, I_2 とすると、 I_2 が I_1 の最近接点である確率は I_1 の最近接点が $(r, r+dr)$ の範囲にある確率に等しいことから、この確率 P_1 は次式 (2.53) となる。

$$P_1 = 2\lambda e^{-2\lambda r} dr \quad (2.53)$$

ただし、 λ は単位長さ当たりの点の数である。また、 I_2 の最近接点が I_1 、および I_1 の最近接点が I_2 である確率は $\frac{3}{2} r$ の線分上の範囲に他の点が含まない確率であるからこの確率 P_2 は、

$$P_2 = \exp\left[-\frac{3}{2} \lambda r\right] \quad (2.54)$$

となる。ゆえに、 I_1 と I_2 が相互に対となる確率は P_1, P_2 であり、すべての可能な r について積分することにより、互いに対の一方となる確率 P が得られる。

$$P = \int_0^\infty P_1 \times P_2 = \int_0^\infty 2\lambda e^{-3\lambda r} dr = \frac{2}{3} \quad (2.55)$$

つまり、直線上のランダムな点の配列に対し、互いに対となる点の割合の期待値は $\frac{2}{3}$ となる。

MORISITA, M.⁵³⁾ や CLARK, P.J.⁵⁴⁾ らは、これらの関係について、 k 次元の j 位番目 (j 位番目の最近接点、第 1 報参照) の点間について互いに対をなす点の割合の期待値の一般式を算定している。その期待値 ${}_k P_j$ は次式 (2.56) で与えられる。

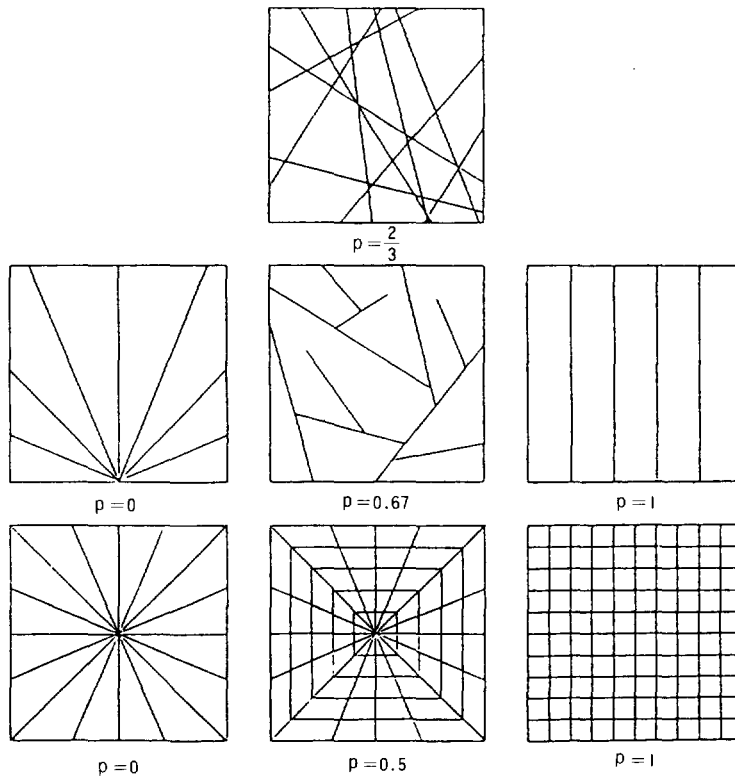
$${}_k P_j = \left(\frac{\frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right) - \pi^{-\frac{1}{2}} \Gamma\left(\frac{k}{2}+1\right) \int_{\frac{1}{2}}^1 (1-x^2)^{\frac{k-1}{2}} dx} \right)^j \quad (2.56)$$

上式 (2.56) から 1~3 次元におけるそれぞれの期待値を算定すると次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} {}_1 P_j &= \left(\frac{2}{3}\right)^j = (0.6667)^j \\ {}_2 P_j &= \left(\frac{6\pi}{8\pi+2^{\frac{3}{2}}}\right)^j = (0.6215)^j \\ {}_3 P_j &= \left(\frac{16}{27}\right)^j = (0.5926)^j \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

全体の点に対し、互いに最近接どうしの点の割合が式 (2.57) の値のとき、その点の分布はランダムとなり、それより大きくなるにしたがって均等パターンとなり、小さくなるにしたがって集中パターンとなることがわかる。

集材路網の形態は一般に一点(土場)を中心に放射状に分散するもの、任意の点から漸次路線が分枝して導入されるものおよび任意路線に対し平行ないし直交に導入されるものに大別できる。図 18 はそれぞれ代表的な路網パターンを示したものであるが、路網上に引いた任意の直線に対し全交点数 N と互いに最近接どうしとなる交点数 n の割合 $\frac{n}{N}$ を p 値とすると次の関係が示される。

図 18. 集材路網の形態と p 値

p 値		
集中型路網	0	(2.58)
ランダム型路網	$\frac{2}{3}$	
直線配列型路網	1	

以上のように、この指標は線分により構成されるもの、例えば河川網、鉄道網あるいは道路網などの形態を把握する場合に有効なものであり、DACEY, M.F.⁵⁵⁾ や HAGGETT, P. ら⁴⁹⁾ により幾つかの適用例が示されている。

ここでは、集材路網の形態を把握する方法として一般に用いられる乱線による方法のかわりに格子網を用い、格子線と集材路網の交点数から路網形態を明らかにする方法を考えた。すなわち、集材路網上にメッシュを覆い、縦横の各格子線について格子線と集材路網の交点を求め、各格子線ごとに互いに近接どうしの交点数を求め全交点数に対して互いに近接どうしの交点数の比率を算定するものである。

$$p = \frac{\sum_{i=1}^m n_i}{\sum_{i=1}^m N_i} \quad (0 \leq p \leq 1) \quad (2.59)$$

ただし、 m : 縦・横の格子線数、 N_i : 各格子線における集材路網との交点数、 n_i : 各格子線に

おける集材路網との交点のうち互いに近接どうしの交点数、である。この p 値により路網の形態を推定することができる。なお、これらの路網の形態を表す指標を以後 p 値と呼ぶことにした。

図 19 は、北海道営林局管内のトラクタ集材地の集材路網を対象に乱線を用いた場合の p 値（乱線法）と格子網を用いた p 値（格子網法）について比較したものである。図から格子網による方法の p 値は乱線を用いた方法の p 値に比べ全般的に大きい値を示し、直線配列型路網に判定されやすい傾向を示しているが、ほぼそれぞれの p 値は正比例の関係となることがわかる。

以上のように集材路網の形態的分類は格子網を用いて簡単に p 値を算定することによって判定が可能となるが、これらの集材路網の形態の違いが集材工程にどのように影響するかについて検討する必要がある。

4.2 集材路網形態と集材走行距離

集材路網の形態の違いは、集材サイクルの時間や距離に影響を与えることになる。

ここでは、集材路網形態とトラクタ集材総走行距離の関係についてモデルを用いて検討した。

集材路網の代表的な形態として、次章で取り上げたような単線型、放射型、樹枝型、幹線型や格子型、循環型などが考えられるが、集材走行のルートからみて三つの路網形態パターンに分けられる。すなわち第1のパターンは集材地内の任意の2点間の距離が集材ごとに土場から順次奥へ導入される路網であり、集材ごとの走行は末端の2点間とそれ以前の集材路上となる。このパターンには土場から単線で導入される単線型やその複合である格子型の路網が相当し、直線配列型の路網形態となる。第2のパターンは土場を中心に集材地内の任意の1点に導入される路網であり、集材ごとに土場を中心に放射あるいは同心円状に配列される路網形態である。このパターンには放射型や循環型が考えられる。第3のパターンは、第1と第2パターンの併用パターンであり、樹枝型や幹線型の路網が考えられる。

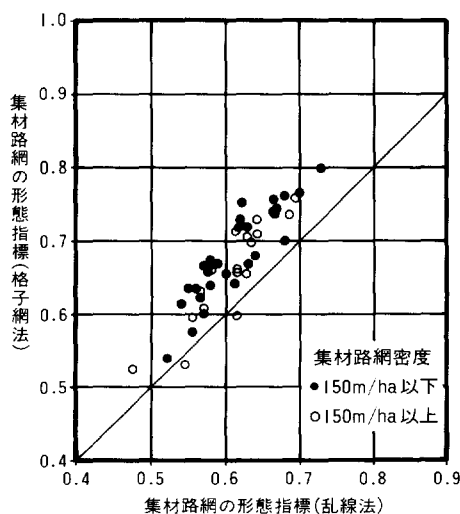


図 19. 乱線法および格子網法による集材路網の形態分類指標の関係

これらの3パターンは式(2.58)からみると、第1パターンの路網の p 値は1に近ずき、第2パターンの路網の p 値は0に近ずき、第3パターンの路網の p 値は $\frac{2}{3}$ となることが推察できる。

集材路網の導入形態については第Ⅲ章においてさらに検討するが、ここではこれらの路網型の総走行距離を理論的に算定した。

ただし、総走行距離は、ここでは路線の導入ごとに1回の集材を行う場合の往復の走行距離である。すなわち集材回数は路線導入回数に等しくなる。

(1) 直線配列型路網（単線型、格子型）

単線型路網は、対象区域内の任意の2点が順

次連結された形態である。図 20 より、路線導入ごとに延長される 2 点間の距離を $l_1, l_2, \dots, l_n$ とすると集材完了時の集材回数 n における集材に要した往復の走行距離 L は式 (2.60) となる。なお、この往復の走行距離を以降総走行距離と呼称する。

$$L = 2 \{l_1 + (l_1 + l_2) + \dots + (l_1 + l_2 + \dots + l_n)\} = n(n+1)\bar{l} \quad (2.60)$$

ただし、 $\bar{l}$: 任意の 2 点間の平均距離。

$l_1, l_2, \dots, l_n$ の平均距離 $\bar{l}$ は対象区域内の任意の 2 点間の平均距離であり、式 (2.9) で求められる。また集材路延長距離 Δ は

$$\Delta = n\bar{l} \quad (2.61)$$

となり、総走行距離 L と Δ には式 (2.62) の関係が成り立つ。

$$L = (n+1)\Delta \quad (2.62)$$

また、トラクタ集材などでは集材搬出の復路は集材路上を經由しないで集材地点から直接土場へ搬出する場合が少なくない。このような場合の総走行距離についてみる。図 21 より、路線導入ごとのステップの長さ $l_1, l_2, \dots, l_n$ が、ある確率分布をもっているとき、導入ごとの各点 $P_1, P_2, \dots, P_n$ と土場 O の平均距離 $\bar{l}_o$ は式 (2.63) で表される⁵⁶⁾。

$$\bar{l}_o = \frac{\sqrt{n\pi E(l^2)}}{2} \quad (2.63)$$

そこで、ステップ長の分布は対象区域内の任意の 2 点間の距離の分布で与えられるから、 $E(l^2)$ は式 (2.10) により求められる。したがって集材回数 n の総走行距離 L は近似的に式 (2.64) で表される。

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} n(n+1)\bar{l} + \frac{1}{2} \sqrt{n\pi E(l^2)} (\sqrt{1} + \sqrt{2} + \dots + \sqrt{n}) \\ &= \frac{n}{2} \left\{ (n+1)\bar{l} + \sqrt{n\pi E(l^2)} \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{2n} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2.64)$$

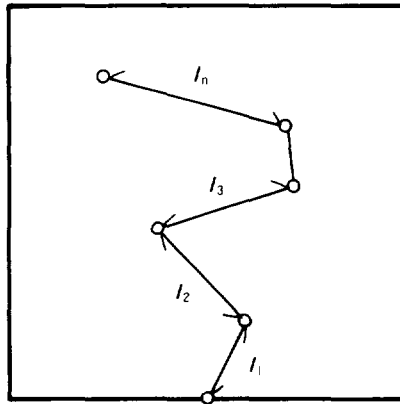


図 20. 単線型の総走行距離（往復とも同一経路）

次に格子型路網についてみる。i, j 行列の格子集材路に対して、各格子点を集材ごとに往復する総走行距離を考える。図22 (a) より、格子網の隅 (1行1列) に基点 (土場) がある場合、格子間隔を ε とすると、基点からの距離が $\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon \dots$ にある格子点の数は 2, 3, 4 $\dots$ となる。一般に (i, j) の格子網に対する基点からの距離 (片道) とその距離にある格子点の数は表6のとおりである。したがって、n 個の格子点を n 回の集材回数で集材する場合の総走行距離 L は式 (2.65) で表される。

$$\begin{aligned}
 L &= 2[\varepsilon \cdot 2 + 2\varepsilon \cdot 3 + \dots + (i-1)\varepsilon \cdot j + \{j \cdot \varepsilon + (j+1)\varepsilon + \dots + i \cdot \varepsilon\} j \\
 &\quad + (i+1)\varepsilon(j-1) + (i+2)\varepsilon(j-2) + \dots + (i+j-2)\varepsilon \cdot 1] \\
 &= 2ij \left(\frac{i+j}{2} - 1 \right) \cdot \varepsilon
 \end{aligned} \tag{2.65}$$

ここで格子点数すなわち集材回数 n は $n = ij - 1$ であり、図22から明らかなように、

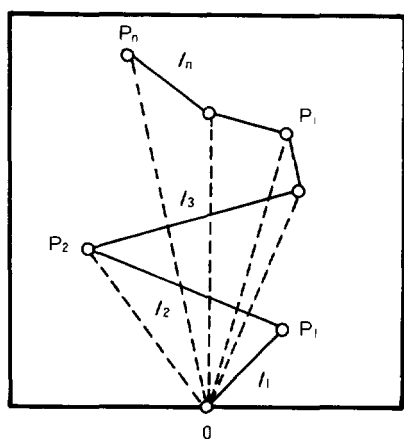
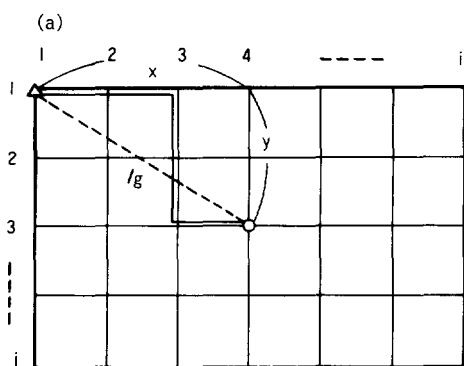


図 21. 単線型の総走行距離 (復路は直接土場へ戻る場合)

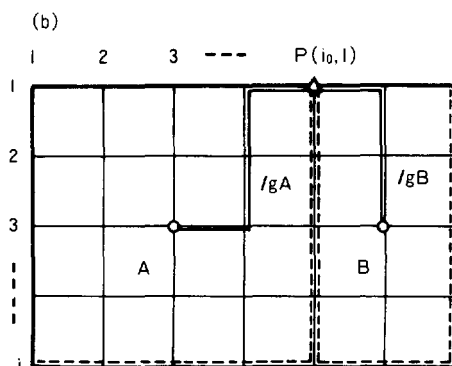
表 6. 基点からの距離と格子点数

基点からの距離(片道)	格子点数
ε	2
2ε	3
3ε	4
$\vdots$	$\vdots$
$(j-1)\varepsilon$	j
$j\varepsilon$	j
$(j+1)\varepsilon$	j
$(j+2)\varepsilon$	j
$\vdots$	$\vdots$
$i\varepsilon$	j
$(i+1)\varepsilon$	j-1
$(i+2)\varepsilon$	j-2
$\vdots$	$\vdots$
$(i+j-2)\varepsilon$	1

注) $i > j$ の場合



土場が隅に在る場合



土場が周辺の一点にある場合

図 22. 格子型の総走行距離

$\left(\frac{i+j}{2}-1\right) \cdot \varepsilon$ は基点から格子網の重心までの格子線上を辿った走行距離に相当することから、この重心までの走行距離を $\bar{l}_g$ とおくと総走行距離 L は式 (2.66) となる。

$$L = 2(n+1)\bar{l}_g \quad (2.66)$$

基点が格子網の周辺上の任意点にある場合についても格子網を分割することにより同様に求められる。図 22 (b) から基点が P (1 行 i_0 列) にある場合、 i_0 列の左右の格子網に分割し、それぞれの格子網の総走行距離を L_A, L_B とすると式 (2.67) となり、全体の総走行距離 L は式 (2.68) となる。

$$\left. \begin{aligned} L_A &= 2i_0j\left(\frac{i_0+j}{2}-1\right)\varepsilon \\ L_B &= 2j(i-i_0+1)\left(\frac{i+j-i_0+1}{2}-1\right)\varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (2.67)$$

$$\therefore L = L_A + L_B = j\{i_0(i_0+j-2) + (i-i_0+1)(i+j-i_0-1)\}\varepsilon \quad (2.68)$$

ここで、基点から各分割格子網の重心までの走行距離を $\bar{l}_{gA}, \bar{l}_{gB}$ とすると

$$\left. \begin{aligned} \bar{l}_{gA} &= \frac{\varepsilon}{2}(i_0+j-2) \\ \bar{l}_{gB} &= \frac{\varepsilon}{2}(i+j-i_0-1) \end{aligned} \right\} \quad (2.69)$$

となり、その平均 $\bar{l}_g$ は式 (2.70) となる。

$$\bar{l}_g = \frac{1}{i} \left\{ i_0 \left(\frac{i_0+j}{2} - 1 \right) + (i-i_0+1) \left(\frac{i+j-i_0+1}{2} - 1 \right) \right\} \varepsilon \quad (2.70)$$

すなわち、総走行距離 L は式 (2.68) に式 (2.70) を代入し、集材回数 $n = ij - 1$ を代入すると式 (2.66) と同様 n と $\bar{l}_g$ の関数で表される。

$$L = 2(n+1)\bar{l}_g \quad (2.71)$$

また格子網の延長距離 Δ は

$$\Delta = \{(i-1)j + (j-1)i\}\varepsilon = \{2ij - (i+j)\}\varepsilon \quad (2.72)$$

であり、それぞれ矩形の辺を a, b とすると

$$i-1 = \frac{a}{\varepsilon} \quad j-1 = \frac{b}{\varepsilon} \quad (2.73)$$

となり、 $n = ij - 1$ をそれぞれ式 (2.72) に代入すると Δ は次式で表されることになる。

$$\Delta = \sqrt{(a+b)^2 + 4abn} \quad (2.74)$$

(2) 集中型路網 (放射型, 循環型)

放射型路網は対象地の一点に基点 (土場) をおき、集材ごとに対象区域内の任意点と基点を往復する形態である。図 23 より集材ごとの基点と任意点間の距離を $l_1, l_2, \dots, l_n$ とすると総走行距離 L は式 (2.75) となる。

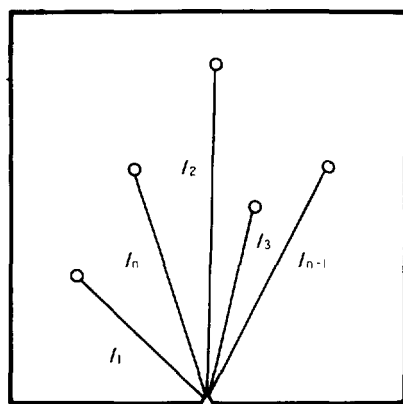


図 23. 放射型の総走行距離

$$L = 2(l_1 + l_2 + \cdots + l_n) = 2n\bar{l} \quad (2.75)$$

ここで集材ごとの $l_1, l_2, \dots, l_n$ は対象区域の周辺上の任意点と対象区域内の任意点までの平均距離の式 (2.8) により, その平均距離 $\bar{l}$ が求まる。また路網延長距離 Δ は $n\bar{l}$ となり, 総走行距離 L は

$$L = 2\Delta \quad (2.76)$$

となる。

循環型路網については対象地の一点に基点 (土場) をおき, その点より対象区域内の任意の点を順次連結してできた閉回路と考え, この閉回路上を循環して集材走行する場合である。図 24 より, 対象区域内の集材ごとの任意点と基点との距離 $l_1, l_2, \dots, l_n$ は放射型の場合と同様その平均距離は式 (2.8) から得られる。そこで簡単にするために, 集材ごとの任意点が円周にある循環路を考えると, 図 24 (b) より円周上の任意点 P_i と基点 O との距離 l_i は, $l_i = 2r \cos \theta$ であるから, その平均距離 $\bar{l}$ は式 (2.77) となる。

$$\bar{l} = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} 2r \cos \theta d\theta = \frac{4r}{\pi} \quad (2.77)$$

すなわち, 循環路は半径 $\frac{\pi\bar{l}}{4}$ とする円周で表されることになり, n 回の集材に対して円周を循環して基点に戻る場合の総走行距離 L および路線延長 Δ は式 (2.78), (2.79) で表される。

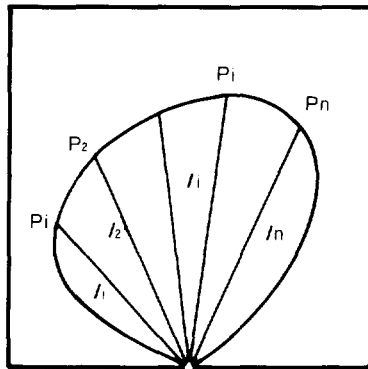
$$L = 2\pi r n = \frac{\pi^2}{2} \bar{l} n \quad (2.78)$$

$$\Delta = 2\pi r = \frac{\pi^2}{2} \bar{l} \quad (2.79)$$

しかし, 実際の集材では循環路が形成されていても常に循環して集材する場合は少なく, 特に平地～緩斜地では, 土場からみて循環路線長の中央附近を境にそれぞれ土場に近い経路を戻って集材される場合が少なくない。このような場合について半径 $\frac{\pi\bar{l}}{4}$ とする円周の循環路では総走行距離 L は式 (2.80) のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{2\pi r}{(n+1)} \cdot \frac{n(n+2)}{2} = \frac{\pi^2 \bar{l}}{4} \cdot \frac{n(n+2)}{(n+1)} && (n \text{ が偶数の時}) \\ L &= \frac{2\pi r}{(n+1)} \cdot \frac{(n+1)^2}{2} = \frac{\pi^2 \bar{l}}{4} \cdot (n+1) && (n \text{ が奇数の時}) \end{aligned} \right\} \quad (2.80)$$

(a)



(b)

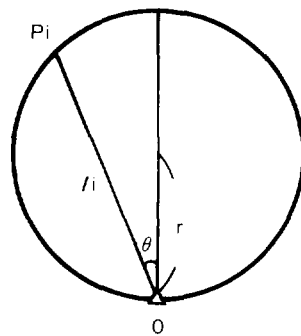


図 24. 循環型の総走行距離

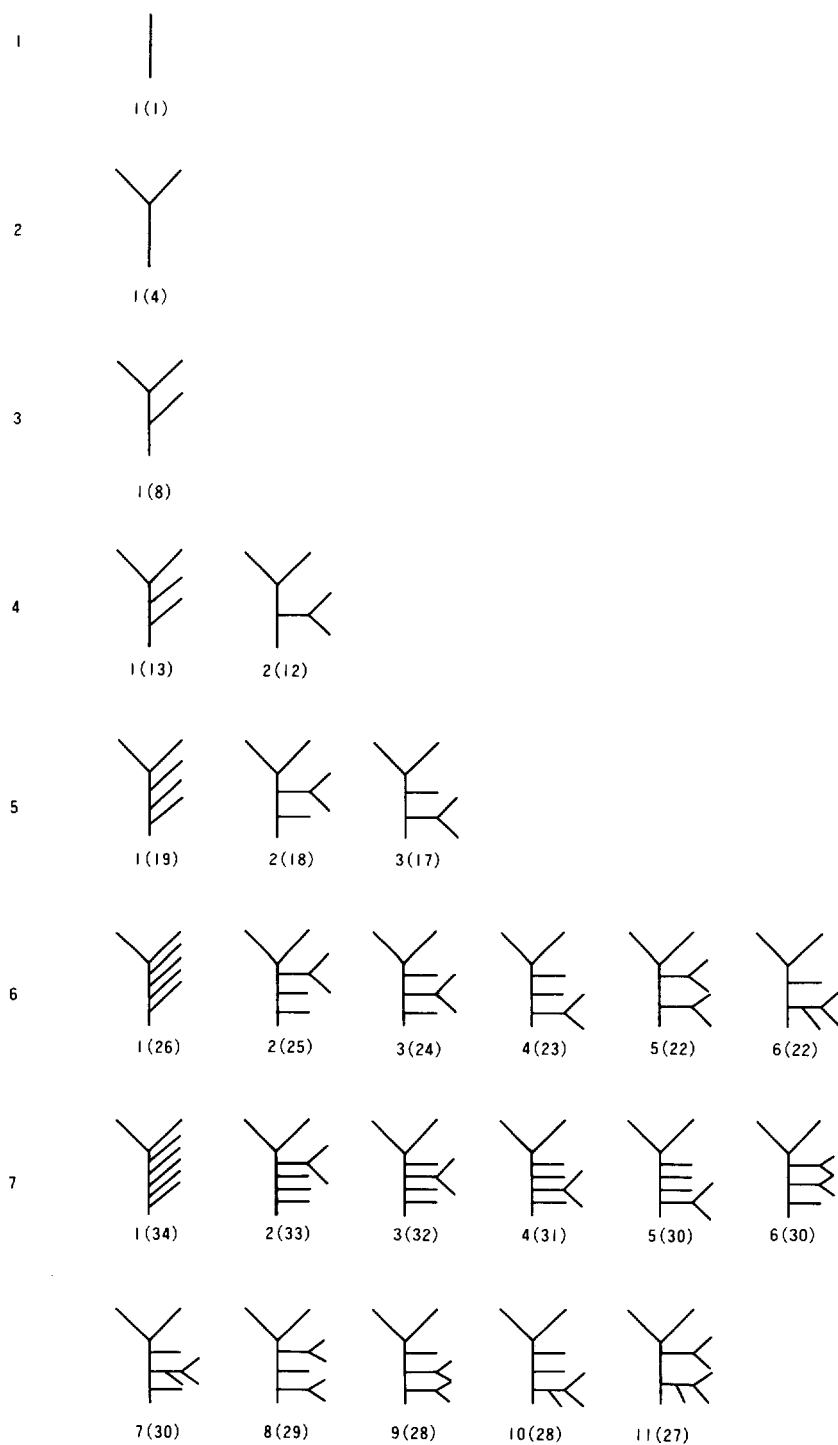


図 25. 樹枝型路網の導入回数と路網パターン（カッコ内の数は土場（基点）までのリンク総数）

表 7. 導入回数ごとの路網パターンと分枝端から基点までのリンク総数

導入回数	樹 枝 型				幹 線 型			
	支点数	路網パターン数	リンク数		支点数	路網パターン数	リンク数	
			MAX	MIN			MAX	MIN
1	0	1	1	1	1	1	2	2
2	1	1	4	4	2	1	5	5
3	2	1	8	8	3	1	9	9
4	3	2	13	12	4	2	14	13
5	4	3	19	17	5	3	20	18
6	5	6	26	22	6	6	27	23
7	6	11	34	27	7	11	35	28
8	7	23	43	32	8	23	44	33

ただし、集材地点 n は 2 以上である。

(3) ランダム型路網（樹枝型、幹線型）

樹枝型路網や幹線型路網は集材ごとに既設集材路から分枝して対象区域内に導入される路網形態である。この路網形態はランダムな線分の集合と考えると、集材ごとの分枝線は既設路からランダムに分岐し、その分岐点は 3 差路の交差となる。これらの路網はグラフ理論に適用するとループのない有向グラフとなり、分岐点あるいは分岐路線数により各路網パターンが示される^{57)~60)}。

図 25 は、樹枝型路網について路線導入回数（集材回数） n とその路網パターンを示したものである。またカッコ内の数字は各分枝端から下方の基点（土場）までのリンク総数（交点間隔の総数） N を示したものである。図から明らかなようにリンクの平均距離を $\bar{l}$ とすると路網の総走行距離 L は $2\bar{l}N$ で表され、リンク総数 N は導入回数 n が大きくなるにしたがって増大する。しかし $n \geq 4$ では同一の導入回数に対して異なる路網パターンが存在することになり、それぞれリンク総数 N は異なる。したがって導入回数ごとのリンク総数は、それぞれの路網パターンの生起確率をもとに算定する必要がある。ここでは導入回数ごとのリンク総数が最大および最小となる路網パターンを取り上げ、両者の平均値をもってその導入回数のリンク総数として表わすことにした。

表 7 は導入回数ごとの路網パターン数およびリンク総数が最大と最小となる路網パターンのリンク総数を示したものである。表からそれぞれリンク総数が最大および最小となる路網パターンの導入回数 n と総走行距離 L の関係を算定すると式 (2.81)、(2.82) のとおりである。

（リンク総数最大の路網）

$$L = 2\bar{l} \{ (1+2+3+\cdots+n) + (n-1) \} = \bar{l} \{ n(n+3) - 2 \} \quad (2.81)$$

（リンク総数最小の路網）

$$L = 2\bar{l} \{ n(k+3) - 2^{k+1} \} \quad (2.82)$$

ただし、 k は $\log_2(n+1) - 1 < k \leq \log_2 n$ の整数である。

したがって、両者の平均は次式 (2.83) となる。

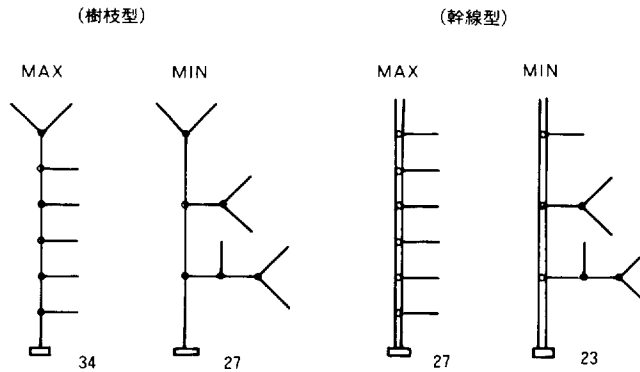


図 26. 交点数 6 の場合の基点までのリンク総数の最大と最小の路網パターン

$$L = \frac{\bar{l}}{2} \left\{ n(n+2k+9) - 2(2^{k+1}+1) \right\} \quad (2.83)$$

また、リンク長はランダムな線分の交点間隔と考えられるので式 (2.26) から、その平均距離 $\bar{l}$ が求まる。さらに 3 差路交差の路網延長距離 Δ は、式 (2.19) を 3 差路の場合に適用すると路線交点数は $(n-1)$ となり、次式 (2.84) で表される。

$$\Delta = \left(1 - \frac{\varphi}{4}\right) \sqrt{(n-1)\pi A} = \frac{3}{4} \sqrt{(n-1)\pi A} \quad (2.84)$$

ただし、 φ は全交点数に対する 3 差路交点数の割合。ここでは $\varphi=1$ となる。

幹線型路網は、対象区域の周囲上の基点（土場）から対象区域内に既に導入された幹線路に対して、この幹線路から支線路が分枝する路網形態であり、形態的には樹枝型路網に準じたものになる。

図 26 は、分岐交点数 6 の場合のリンク総数が最大と最小の路網パターンについて樹枝型と幹線型を比較したものである。表 7 から明らかなように幹線型は樹枝型に比べ同一の分枝交点数に対して導入回数は 1 回少なくなり、同一導入回数に対してリンク総数は 1 個多くなることがわかる。したがって樹枝型路網の場合と同様に幹線型路網について導入回数 n と総走行距離 L の関係を求めると式 (2.85) および (2.86) のとおりである。

（リンク総数最大の路網）

$$L = 2\bar{l} \{ (1+2+3+\cdots+n) - 1 \} = \bar{l}n(n+3) \quad (2.85)$$

（リンク総数最小の路網）

$$L = 2\bar{l} \{ n(k+3) - 2^{k+1} + 1 \} \quad (2.86)$$

ただし、 k は $\log_2(n+1) - 1 < k \leq \log_2 n$ の整数である。

両者の平均は、式 (2.87) となる。

$$L = \frac{\bar{l}}{2} \left\{ n(n+2k+9) - 2(2^{k+1}-1) \right\} \quad (2.87)$$

また平均リンク長 $\bar{l}$ は交点数が導入回数 n に等しいことから、式 (2.26) より $\bar{l} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi A}{n}}$

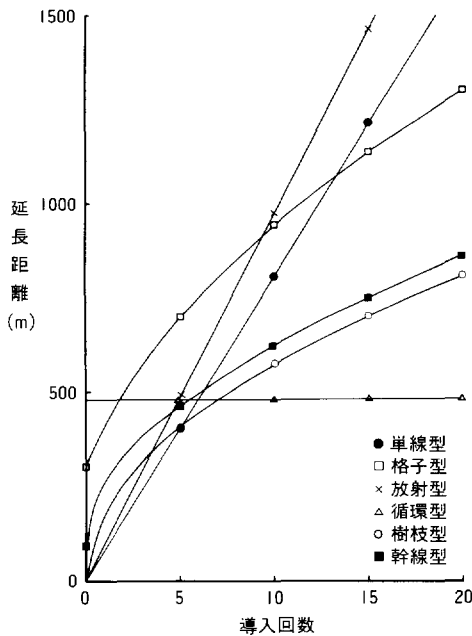


図 27. 路網型ごとの導入回数と延長距離

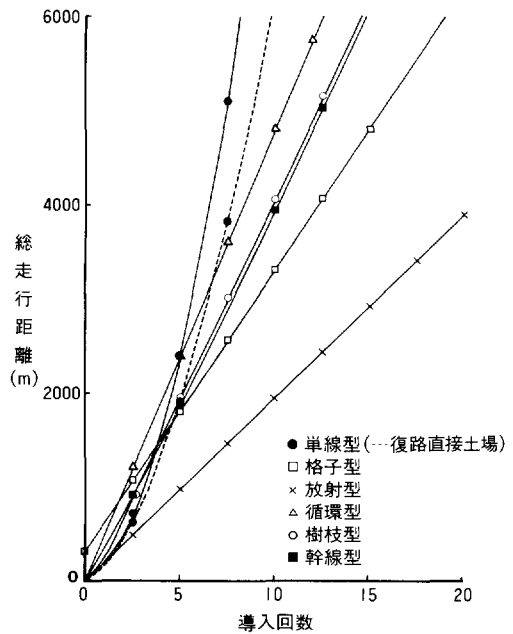


図 28. 路網型ごとの導入回数と総走行距離

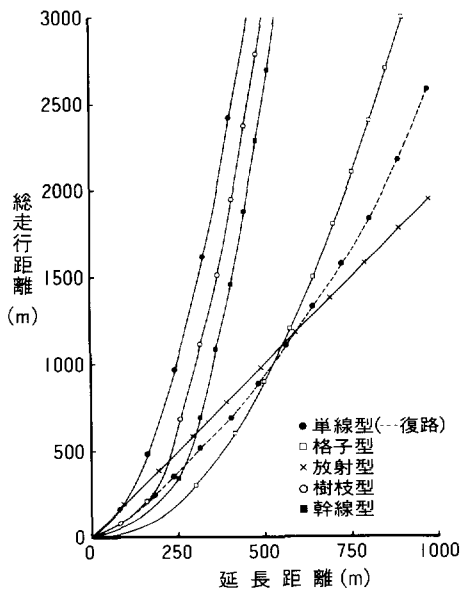


図 29. 路網型ごとの延長距離と総走行距離の関係

となり、路網延長距離 Δ は次式 (2.88) で与えられる。

$$\Delta = \frac{3}{4} \sqrt{n\pi A} \quad (2.88)$$

なお、次章では、この幹線型路網について、特にリンク総数が最大となる路網パターンを幹線魚骨型、その他の場合を幹線樹枝型として区別して取り上げている。

以上各集材路網型に関して集材ごと（導入回数ごと）の総走行距離についてモデルを使って検討を行ったが、路線導入ごとに1回の集材を行う場合の集材回数 n に対する往復の走行距離 L と路網延長距離 Δ について示すと図27および図28のとおりである。また、路網延長距離 Δ と総走行距離 L の関係は図29のとおりである。図はそれぞれ対象区域

を $200\text{ m} \times 100\text{ m}$ の矩形モデルの場合であり、循環型は循環する場合を取り上げた。また基点（土場）の位置は、格子型については矩形の隅にある場合であり、その他の路網型については周囲

上の任意点にある場合を想定した。

図から、各路網型とも導入回数が増えるにしたがって総走行距離は増大するが単線型や循環型の総走行距離の増加傾向はその他の路網型に比べて大きく、放射型は逆に最も小さい増加傾向を示している。また路網延長距離は循環型を除いた路網型は導入回数の増加とともに増大し、特に放射型や単線型はその増大傾向が顕著であることがわかる。さらに樹枝型路網は導入回数に対して最小の延長距離ですむことがわかった。

以上、トラクタ集材路網について対象伐区に対しどのように配置されているかというマクロな分類と集材路網自身の形態的な分類から路網のパターン化について検討したが、トラクタ集材作業にとって集材路網を“どこに”、“どれだけ”さらに“どのように”導入するかは集材作業の成否を左右する重要な因子であり、種々の集材要因に対して集材機能を発揮させる集材路網の型や配置の選定が不可避なものとなる。こうした意味から、集材計画の立案の際、それぞれの条件に適した集材路網を簡易に盛り込む方法として、ここで得られた分類指標は有効なものとなる。

第5節 トラクタ集材路網の事例分析

トラクタ集材現場において集材用に使用される路網は、低規格のトラクタ専用道（トラクタ道）のほか、林道や作業道も含まれる。しかし当該集材を対象とした場合、その対象伐区に含まれる林道や作業道は少なく、集材路網密度の大部分はトラクタ道によって占められる。したがってその集材路網の構成は、林道や作業道だけの場合に比べ複雑なものとなり、現場条件により多様な形態をとることが推察される。また一般にいうトラクタ道には規格の面からみて、あらかじめ道付けされる集材道から林内の地表障害を整理した程度の道まで多岐にわたっている。

本節では、トラクタ集材作業の現状分析を行うとともに、トラクタ集材路網の配置計画のための評価値について検討した。

事例分析の調査は、国有林のトラクタ集材現場を対象に行ったものであり、対象集材地は天然林160か所、人工林112か所の合計272営林署である^{61)~65)}。

5.1 トラクタ集材作業に関する因子

トラクタ集材作業に影響を与える因子はきわめて多く、集材効率に関する因子だけを取り上げてみてもそれらの因子がどのように集材効率に影響を与えているか定かでない。また、これらの因子は集材の規模や地域性によってその重要度は違ってくる。いずれにしてもトラクタ集材計画を立案する場合、これらの因子と集材作業との関係を明らかにする必要があるが、数多いすべての因子について、その関係を明らかにするよりも因子間の関連の中から、トラクタ集材作業にとって重要な因子を抽出し分類して与える方が比較する場合にも評価値として与える場合にも当を得たものとなる。

表8は、トラクタ集材作業に関する作業条件と集材方法に関する各因子についてパターン分類の数量化により分類抽出された因子とその因子ごとのカテゴリーに対する調査事例件数を示したものである。また表9は、それぞれ抽出された因子についてその平均値を示したものである。ここでは、これらの表から作業条件、集材方法および集材所要人工数について概要を述べる。

表8. 作業条件と集材方法のクロス表

集材方法 作業条件			トラクタ機種			組人員			集材路網密度			平均木寄せ距離			土場数		
			ク ロ ー ラ	ホ イ ー ル	ホ イ ク ロ ー ラ	4 人	5 7 人	8 人	100 m	101 150 m	151 m	20 m	21 30 m	31 m	1 個	2 個	3 個
地形の 複雑さ	単 複	純 雑	124	39	21	83	84	17	66	61	57	116	44	24	112	28	44
			55	26	7	44	29	15	25	31	32	53	26	9	55	15	18
人・天・別	人 天	工 然 林	80	29	2	75	36	0	34	34	43	62	24	25	83	12	16
			99	36	26	52	77	32	57	58	46	107	46	8	84	31	46
伐採 方法	皆 択 皆	伐 (漸・間) ・ 択 伐	120	34	8	98	60	4	51	49	62	96	39	27	122	17	23
			24	18	14	12	28	16	27	18	11	30	22	4	14	13	29
			35	13	6	17	25	12	13	25	16	43	9	2	31	13	10
傾 斜 (度)	～15		60	24	13	44	49	4	33	31	33	60	23	14	56	13	28
	16～25		91	32	14	63	48	26	49	50	38	86	36	15	81	26	30
	26～		28	9	1	20	16	2	9	11	18	23	11	4	30	4	4
林の 道か ら離 (m)	～200		87	26	7	69	45	6	42	37	41	69	31	20	77	14	29
	201～400		60	27	11	41	43	14	31	35	32	66	22	10	60	21	17
	401～		32	12	10	17	25	12	18	20	16	34	17	3	30	8	16
集面 材積 (ha)	～10		116	29	6	91	57	3	42	44	65	90	38	23	123	14	14
	11～30		40	13	6	28	29	2	21	28	10	39	14	6	34	16	9
	31～		23	23	16	8	27	27	28	20	14	40	18	4	10	13	39
伐本 採数 (本)	～2000		67	13	13	44	45	4	30	31	32	63	27	3	71	14	8
	2001～6000		75	35	12	54	47	21	41	39	42	71	29	22	68	22	32
	6001～		37	17	3	29	21	7	20	22	15	35	14	8	28	7	22
伐材 採積 (㎡)	～1000		57	14	2	43	28	2	28	18	27	45	16	12	58	10	5
	1001～4000		102	29	15	74	67	5	42	54	50	90	39	17	102	27	17
	4001～		20	22	11	10	18	25	21	20	12	34	15	4	7	6	40
平材 均積 (㎡/本)	～0.5		79	25	3	64	39	4	38	34	35	58	24	25	74	14	19
	0.6～1.0		50	15	6	32	34	5	19	24	28	50	18	3	43	14	14
	1.1～		50	25	19	31	40	23	34	34	26	61	28	5	50	15	29

表から、まず伐区面積（集材面積）は、天然林施業と人工林施業ではその大きさは異なり、天然林の伐区面積（平均 34.2 ha）は、人工林の場合のほぼ 4 倍となっている。また伐採方法別にみると皆伐の伐区面積は天然林および人工林ともほぼ 7～8 ha であり、択伐では皆伐の場合の約 8 倍の大きさとなっている。したがって伐採本数や伐採材積も人・天別あるいは伐採方法により異なってくるが、伐採木 1 本当たりの材積が天然林は人工林に比べて大きいことから、ha 当たりの伐採本数は人工林は天然林の 6.6 倍であるのに対し ha 当たりの伐採材積は人工林は天然林の 2.7 倍程度となっている。

また地形傾斜についてみると天然林および人工林地とも 15°～20° の場合が最頻の正規型分布を

表 9. パターン分類により抽出された作業条件および集材方法の各因子の平均
(国有林)

要因	因子	天 然 林			人工林 (皆伐)
		皆伐	択伐	皆・択伐	
作業条件	1 伐区面積 (ha)	7.80	63.80	36.60	7.00
	2 地形傾斜 (度)	16.80	16.80	19.10	20.50
	3 立木材積 (m^3 / ha)	205.00	230.40	158.50	362.80
	4 伐採本数 (本)	2013.00	2858.00	3567.00	6220.80
	5 伐採材積 (m^3) (m^3 / ha)	1426.60 (188.00)	3952.00 (69.10)	3355.70 (97.80)	2069.70 (326.10)
	6 伐採木 1 本当材積 ($\text{m}^3 / \text{本}$)	0.83	1.62	1.18	0.39
	7 林道・作業道からの距離 (m)	430.60	371.10	367.30	238.00
集材方法	1 土場数 (土場面積) (m^2)	1.64 (998.60)	3.61 (4303.10)	2.19 (1912.30)	1.47 (702.20)
	2 トラクタ台数 (台)	1.36	2.16	1.92	1.11
	3 集材路網密度 (m / ha)	142.30	103.70	131.10	131.40
	4 平均木寄せ距離 (m)	18.20	22.30	18.70	27.00
	5 組人員 (人)	9.30	13.90	13.60	7.90

示したが平均斜度 30° 以上の集材地の事例も存在した。さらに林道・作業道と伐区の位置関係をみると全事例のほぼ 44% は林道・作業道から伐区までの距離は 200 m 以内となり、林道・作業道から 400 m 以上離れた集材地は約 20% であった。また人工林地の場合は天然林地に比べ林道・作業道と伐区間の距離は小さいことがわかる。

次に集材方法についてみる。まず土場数は事例数の 61% が 1 土場で集材が実行されているが、伐区面積の大きい天然林択伐施業地では平均 3~4 土場であった。また 1 伐区当たりの使用トラクタ台数は大部分は 1 台であり、大半がクローラトラクタであるが、伐区面積が大きく土場数が多い天然林択伐地では 2~3 台のクローラおよびホイールトラクタ併用による集材が行われている。集材路網密度はほぼ平均 130 m/ha であったが、皆伐地は択伐地に比べ集材路網密度は大きいことがわかる。したがって木寄せ距離は皆伐地は択伐地に比べ短かくてすむことになるが、人工林地では地形傾斜の影響により木寄せ距離も大きくなっている。さらにセット人員についてみると、天然林の場合 11.6 人、人工林では 7.9 人となり、伐区面積や伐採材積が大きいほど組人員も多くなることがわかる。

表 10 は、集材作業種ごとの所要人工数を示したものである。表は人・天別に主作業と副作業の各作業内容の 1 伐区当たりの人工数とその比率および伐区ごとの平均作業工期 ($\text{m}^3 / \text{人工数}$) を示したものである。表から明らかなように、トラクタ集材作業における主作業の比率は、天然林および人工林の場合ともほぼ 80~85% を占めており、主作業のうち伐倒作業が最も人工数を必要としている。また人工林は天然林に比べ伐倒本数が多いため、その人工数は多いが、1 本当たりの材積が小さいので作業工期は小さくなる。これらのことは主作業の作業種ごとにいえるが、トラクタ集材路網計画に直接関係する木寄せ・荷掛け作業と集材搬出（運搬）作業は主作業人工数のほぼ 20

表 10. 人・天別の主・副作業人工数比率と平均作業工期

作 業 内 容		天 然 林			人 工 林			計
		人工数	%	m ³ / 人工	人工数	%	m ³ / 人工	
主 作 業	伐 倒 作 業	161.8	21.9	16.53	215.4	32.7	7.36	
	木寄せ・荷掛け	90.4	12.3	27.47	64.5	9.8	23.47	
	集 材 搬 出	98.2	13.3	25.51	67.8	10.3	23.53	
	造 材 作 業	89.8	12.2	31.45	110.6	16.8	13.50	
	巻 立 作 業	154.6	21.0	16.13	102.3	15.5	11.99	
	小 計	594.8	80.7	4.95	560.6	85.1	4.52	
副 作 業	トラクタ道 作設・補修	47.4	6.4	39.34	26.3	4.0	16.66	
	土 場 開 設	17.0	2.3	14.67	29.6	4.5	28.17	
	そ の 他	78.2	10.6	88.59	42.1	6.4	41.92	
	小 計	142.6	19.3	16.81	98.0	14.9	20.73	
合 計		737.4	100.0	3.82	658.6	100.0	3.71	3.78

～30% を占めることになり、その作業工期は約 25 (m³/人工数) であり、天然林は人工林に比べ多少大きいことがわかる。

トラクタ集材作業における副作業は、主にトラクタ道の作設・補修と土場開設である。これらの作業に要する人工数は全体の 10% 程度にすぎないが、トラクタ集材路網計画を考える場合、これらの要素は重要な決め手となる。

以上、これらの分析からトラクタ集材路網計画に必要な評価値として施業方法別の各要素作業ごとの単位材積当たりの平均所要人工数を第 IV 章の表 22 に示したが、ここでは、トラクタ集材路網計画に直接関係する木寄せ・荷掛け作業人工数と集材搬出人工数について、単位材積当たり単位距離当たりの木寄せ・荷掛け作業人工数および集材搬出人工数について分析を行い、それぞれ平均的な評価値を算定した。

分析結果を示すと式 (2.89) のとおりであり、表 11 に示す評価値が得られた。

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_2 &= 0.4342 E-2 e^{-0.4942 w_v} \\ \bar{a}_3 &= 0.3301 E-3 e^{-0.4278 w_v} \end{aligned} \right\} \quad (2.89)$$

ただし、 $\bar{a}_2$: 単位材積当たり、単位木寄せ距離当たりの木寄せ・荷掛け作業人工数 (人工数/m³・m)、 $\bar{a}_3$: 単位材積当たり、単位集材距離当たりの集材搬出人工数 (人工数/m³・m)、 w_v : 集材木 1 本当たりの材積 (m³) である。また、E は指数表示であり、E-2=0.01、E-3=0.001 である。

5.2 トラクタ集材路網パターンとその要因

トラクタ集材路網パターンに関係する要因について、北海道営林局管内のトラクタ集材地を取り上げ分析を行った。分析はトラクタ集材路記載の集材現場の地形図 (1/5000) を基に行ったものであり、調査地は伐区ごとに取り上げた。調査事例はそれぞれ皆伐 (42 箇所)、皆・択伐 (55 箇所)、択伐 (65 箇所)、漸伐 (2 箇所)、間伐 (1 箇所) の合計 165 箇所である^{61), 62)}。

表 11. 国有林を対象とした木寄せ・荷掛け人工数と集材搬出人工数の評価値

集材木 1 本 当たり材積 w_v (m^3)	木寄せ・荷掛け人工数		集材搬出人工数				
	$\bar{a}_2$	a_N	$\bar{a}_3$	a_L (人工/総走行距離)			
	(人工/ $m^3 \cdot m$)	(人工/本 $\cdot m$)	(人工/ $m^3 \cdot m$)	$w_S=2$ (m^3)	$w_S=3$	$w_S=4$	$w_S=5$
0.4	0.3563 E-2	0.1425 E-2	0.2781 E-3	0.5562 E-3	0.8343 E-3	1.1124 E-3	1.3905 E-3
0.6	0.3228 E-2	0.1937 E-2	0.2553 E-3	0.5106 E-3	0.7659 E-3	1.0212 E-3	1.2765 E-3
0.8	0.2924 E-2	0.2339 E-2	0.2344 E-3	0.4688 E-3	0.7032 E-3	0.9376 E-3	1.1720 E-3
1.0	0.2649 E-2	0.2649 E-2	0.2151 E-3	0.4302 E-3	0.6453 E-3	0.8604 E-3	1.0755 E-3
1.2	0.2400 E-2	0.2880 E-2	0.1975 E-3	0.3950 E-3	0.5925 E-3	0.7900 E-3	0.9875 E-3
1.4	0.2174 E-2	0.3044 E-2	0.1813 E-3	0.3626 E-3	0.5439 E-3	0.7252 E-3	0.9065 E-3
1.6	0.1969 E-2	0.3150 E-2	0.1665 E-3	0.3330 E-3	0.4995 E-3	0.6660 E-3	0.8325 E-3
1.8	0.1784 E-2	0.3211 E-2	0.1528 E-3	0.3056 E-3	0.4584 E-3	0.6112 E-3	0.7640 E-3
2.0	0.1616 E-2	0.3232 E-2	0.1402 E-3	0.2804 E-3	0.4206 E-3	0.5608 E-3	0.7010 E-3

注) w_S : 1 回当たりの積載量 (m^3)

5.2.1 伐区形状とトラクタ集材路網パターン

トラクタ集材作業において、集材路網は集材量が大いほどその投入量は大きくなり伐区面積が大いほどその延長距離は長くする必要がある。しかし、同一集材量あるいは同一伐区面積に対して集材に必要な路網密度が同じとしても、その伐区形状の違いにより集材路網の配置や形態は異なる。

伐区の形状は細長いものから正方形や円形のような広がりをもつものまで多様な形がある。これらの対象区域の形状を表す指標として形状係数が示されている^{47),49),50)}。式 (2.90) はそれぞれ対象区域の周長と面積から求める形状係数と対象区域の最長軸の径長（最長の対角線長）と面積から求める形状係数の算定式について示したものである。

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 4\pi A/L_s^2 = 12.5664 A/L_s^2 \\ k_2 &= 4A/\pi d_s^2 = 1.2732 A/d_s^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.90)$$

ただし、 A : 対象区域の面積 (m^2)、 L_s : 対象区域の周長 (m)、 d_s : 対象区域の最長軸径 (m)。

両形状係数 k_1, k_2 は、式 (2.90) から明らかなように、0~1 の範囲をとり、対象区域の形状が円形に近いほど 1 に近ずき、細長い形状ほど 0 に近づくことになる。

集材計画を立案する際、集材区域をモデル化する場合、一般にその形状は矩形とみなすことが多い。矩形形状の違いについては第 2 節でも述べたように矩形の短辺・長辺の比で表すことができる。式 (2.90) の各形状係数 k_1, k_2 は、矩形の短辺・長辺の比すなわち形状指数 k ($k = \frac{b}{a}$, $0 < k \leq 1$, a : 矩形の長辺, b : 矩形の短辺) に換算することができる。

式 (2.91) および式 (2.92) は、これらの関係を示したものであり、それぞれ換算値は表 12 のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{\pi k}{(1+k)^2} \\ k_2 &= \frac{4k}{\pi(1+k^2)} \end{aligned} \right\} \quad (2.91)$$

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{\pi^2}{4} \left\{ 1 - \frac{2k}{(1+k)^2} \right\} \quad (2.92)$$

図 30 は、調査伐区の形状について示したものである。図は縦軸に最長軸径より求めた形状係数 k_2 、横軸に周長より求めた形状係数 k_1 をとり、それぞれの調査伐区をプロットしたものである。

図から、集材地の伐区形状は細長い形状から円形に近いもので分布しているが、形状係数 k_1 に

表 12. 伐区形状係数と矩形の短辺・長辺の比

k	A	L_s	d_s	k_1	k_2
0	0	2a	a	0	0
0.1	$0.1a^2$	2.2a	$\sqrt{1.01}a$	0.2596	0.1261
0.2	$0.2a^2$	2.4a	$\sqrt{1.04}a$	0.4363	0.2448
0.3	$0.3a^2$	2.6a	$\sqrt{1.09}a$	0.5577	0.3504
0.4	$0.4a^2$	2.8a	$\sqrt{1.16}a$	0.6411	0.4390
0.5	$0.5a^2$	3.0a	$\sqrt{1.25}a$	0.6981	0.5093
0.6	$0.6a^2$	3.2a	$\sqrt{1.36}a$	0.7363	0.5617
0.7	$0.7a^2$	3.4a	$\sqrt{1.48}a$	0.7609	0.5981
0.8	$0.8a^2$	3.6a	$\sqrt{1.64}a$	0.7757	0.6210
0.9	$0.9a^2$	3.8a	$\sqrt{1.81}a$	0.7832	0.6331
1.0	a^2	4.0a	$\sqrt{2.00}a$	0.7854	0.6366

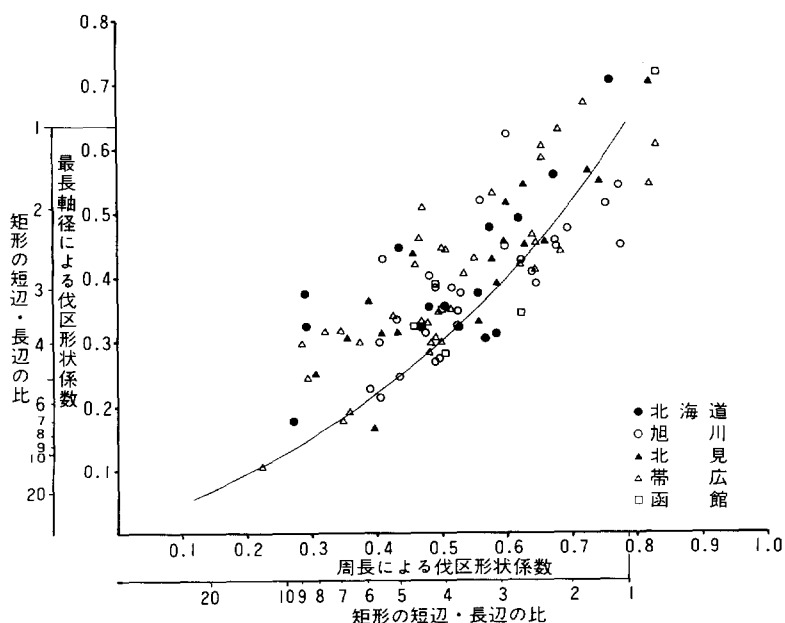


図 30. 伐区の周長による伐区形状係数 (k_1) と伐区的最長軸径による伐区形状係数 (k_2) および矩形の短辺・長辺の比への換算

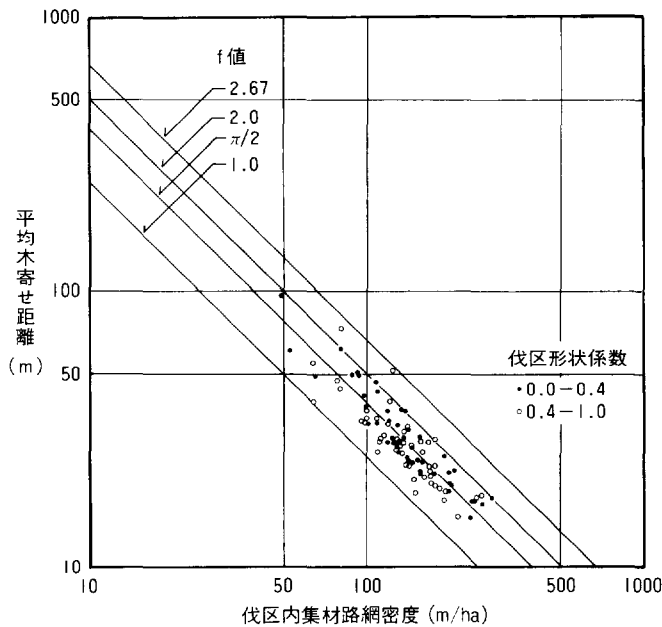


図 31. 伐区形状係数の違いによる集材路網の配置指標（ f 値）の関係

対して 0.5~0.7, 形状係数 k_2 に対しては 0.3~0.5 の範囲に多く分布している。これらの値は、矩形の短辺と長辺の比 k に換算すると 0.3~0.5 となり、矩形の短辺 1 に対し長辺 2~3.3 倍となる伐区形状である。

また、形状係数 k_1, k_2 は、 k_1 が大きくなるにしたがって k_2 も大きくなり、図中の実線で示す関係となるが、調査事例では k_1 と k_2 間に多少のバラツキが認められている。これは対象伐区の形状が凹領域のものが含まれているためであり、すべてが凸領域の伐区であれば相関は高くなることが推察される。つまり、凸領域の伐区に対しては、伐区の周長を計測しなくても伐区の最長軸径を求めることによって簡単に、その伐区形状を判定することができる。

そこで、この形状係数 k_2 を用いて集材路網パターンとの関係についてみる。

図 31 は、伐区形状と集材路網の配置指標（ f 値）の関係を示したものである。図は、形状係数 k_2 が 0.4（矩形の短辺・長辺比 k に換算すると $k=0.353$ ）以上と以下に分け、それぞれの伐区についてプロットしたものである。図から、 $k_2=0.4$ 以下の細長い伐区形状では、ランダムな路網配置を示す f 値 $= \frac{\pi}{2}$ の線上周辺にかたまってプロットされている。また、 $k_2=0.4$ 以上の正方形や円形に近い伐区形状では、集材路網の配置は均一パターンに近いものから集塊パターンに近いものまで分布しており、集材区域が広がりをもつ丸い伐区形状になるほど、集材路網は多様な配置をとることがわかる。言い換れば広がりをもつ丸形状の伐区では均一の路網配置にもなる反面余分な集材路も導入されやすいことを示している。

次に、集材路網の形態パターンと伐区形状の関係についてみた。

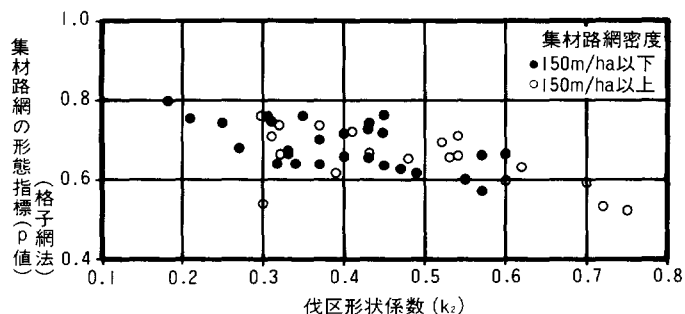
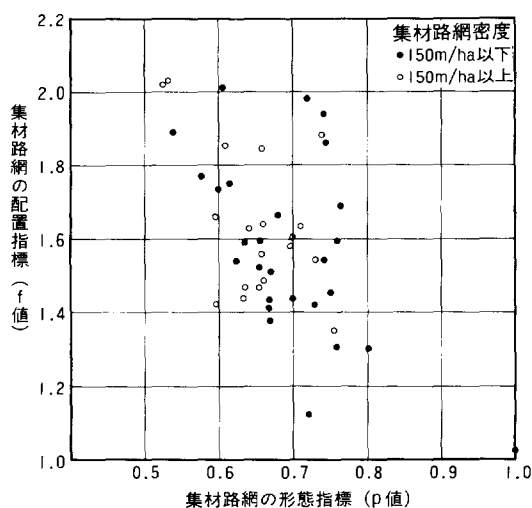
図 32. 伐区形状係数 (k_2) と集材路網の形態指標 (p 値)

図 33. トラクタ集材路網の形態と路網配置の偏りの関係

図 32 は、第 4 節で求めた格子網法による集材路網の形態指標 (p 値) と伐区形状係数 k_2 の関係を示したものである。図は、1 伐区に 1 か所の土場を有した集材地を対象としたものである。図から、 p 値は形状係数 k_2 が大きいほど小さくなる。すなわち、伐区が細長い形状ほど、直線配列型路網（単線型、格子型）になり、広がりをもつ丸形の伐区形状になるほど、集中型路網（放射型、循環型）になりやすいことがわかる。また図は集材路網密度が 150 m/ha 以上と以下について示しているが、集材路網密度の違いにはほとんど関係しないことがわかる。同様のデータについて集材路網の形態指標 (p 値) と配置指標 (f 値) の関係を示すと図 33 のとおりである。図から、 f 値は p 値が大きくなるにしたがって小さくなる傾向を示している。つまり、直線配列型路網形態ほど路網配置の偏りは小さく、集中型路網形態ほど偏りは大きくなる傾向がうかがえる。

5.2.2 地形傾斜と集材路網の配置

トラクタは、地形傾斜が急になると登坂や転倒の条件から、林内への導入は困難となり、トラク

タ導入路の延長距離は短くなる。その結果集材を実行するためにはウインチによる木寄せ距離を長くしてやることになる。しかし、木寄せ距離にも限界があるのでこのような急傾斜地で集材を実行し、集材を可能にするためには、作設施工を施したトラクタ道を、あらかじめ対象地内に配設してやる必要がある。したがって、ウインチによる木寄せ距離を一定とした場合、地形傾斜が急になるほど支線部の作設施工を施さないトラクタ道の延長距離は短くなるが、作設施工を施した幹線部のトラクタ道の延長距離は地形傾斜が急になることによって迂回率が大きくなったり、路網配置の偏りが大きくなることから長くなり、全体の集材路網密度はかえって高くなることが推察される。

図 34 は調査地の地形傾斜と全集材路網密度の関係を示したものである。ただし、地形傾斜は

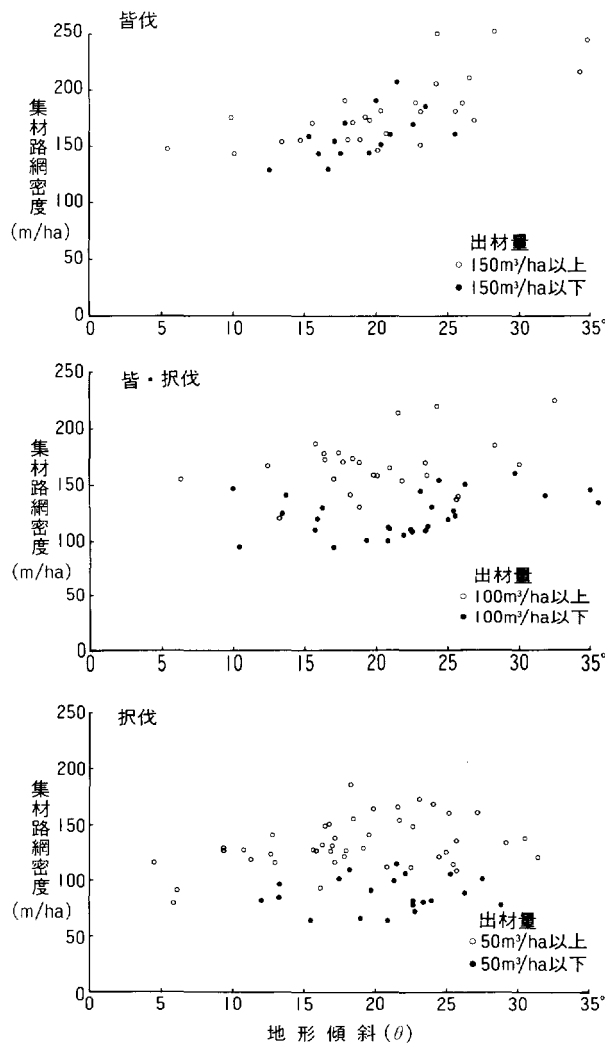


図 34. 地形傾斜とトラクタ集材路網密度の関係

Horton の交点法により算定したものであり、伐区境界部分に介在しやすい沢や尾根部分の複雑地形が含まれているため多少大きくなっている。図は、皆伐地、皆・択伐地および択伐地別に図示したものであるが、顕著な関係は認められないものの、地形傾斜が大きくなるにしたがって集材路網密度も高くなる傾向を示している。これらの関係について地形傾斜ごとの集材路網密度の平均値を示すと表13のとおりである。ただし皆伐地は皆・択伐地を含めたものである。表から、皆伐地および択伐地とも地形傾斜が急になるにしたがって集材路網密度は高くなり、地形傾斜が15°以上と以下では差があることが認められた。

また地形傾斜と平均木寄せ距離の関係について示すと図35のとおりである。図は調査地の平均木寄せ距離の度数分布を示したものであり、地形傾斜20度以上と以下の場合の調査地についてそれぞれ示したものである。ただし、木寄せ距離は対象地内の50m間隔のメッシュの交点より最寄り集材路線までの平均距離である。図から平均木寄せ距離の分布は地形傾斜20度以上と以下ではほとんど差がなく、ほぼ20～30mとなり、平均木寄せ距離は地形傾斜にはあまり関係しないことがわかる。

表13. 伐採方法別の地形傾斜と集材路網密度

平均傾斜(度)		～5	～10	～15	～20	～25	～30	～30以上
皆伐	100m ³ /ha以上*	128.5	139.9	134.0	159.2	181.3	194.7	247.7
	100m ³ /ha以下	—	102.2	—	103.1	120.8	146.2	155.6
	全 体	128.5	130.5	134.0	152.4	158.6	168.8	201.7
択伐	50m ³ /ha以上	115.1	101.2	123.7	135.2	149.7	152.7	142.4
	50m ³ /ha以下	—	—	86.8	90.5	89.4	100.5	—
	全 体	115.1	101.2	109.9	127.0	116.2	121.4	142.4

注) *: 出材量 (m³/ha)

(単位: m/ha)

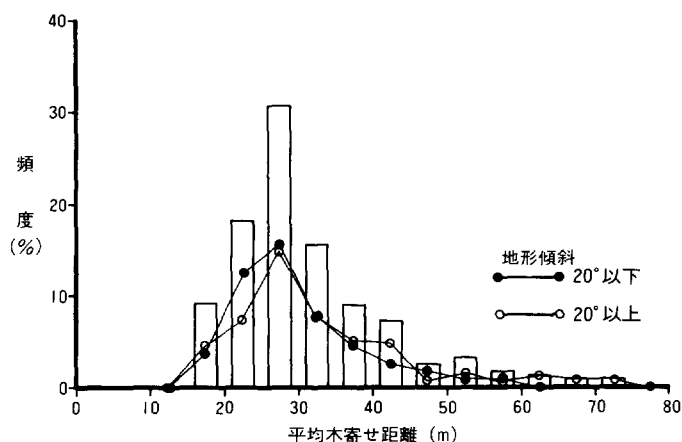


図35. 地形傾斜別の平均木寄せ距離の度数分布

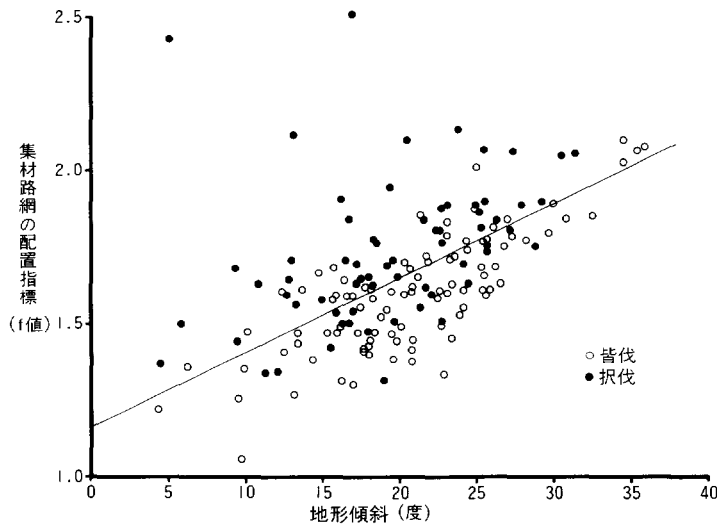


図 36. トラクタ集材路網の配置指標（f 値）と地形傾斜の関係

さらに集材路網の配置指標と地形傾斜の関係についてみると図 36 のとおりである。図はそれぞれ皆伐地（皆・択伐地を含む）と択伐地（漸伐地を含む）について縦軸に集材路網の配置の偏りを表す f 値、横軸に地形傾斜をとったものであるが、f 値は地形傾斜が急になるにしたがって大きくなる傾向を示した。これらの関係は式 (2.93) のとおりである。

$$f = 0.0240 \theta + 1.1577 \quad (r = 0.6973) \quad (2.93)$$

ただし、f: 集材路網の配置指標（f 値）、 θ : 地形傾斜（度）である。

図および式から、集材路網の配置は地形傾斜が急になるほど集塊した配置になり、平坦地形などは均一な配置となること、また同一の地形傾斜に対して、択伐地は皆伐地に比べて路網配置の偏りは大きいことがわかった。式 (2.93) から、それぞれの地形傾斜ごとの f 値を算定すると、 $\theta = 10^\circ$ では 1.3～1.4、 $\theta = 20^\circ$ では 1.64、 $\theta = 30^\circ$ では 1.9 が与えられる。

5.2.3 林道・作業道とトラクタ道の関係

集材地に林道や作業道が多く導入されていると、集材はウインチにより直接林道端や作業道端まで搬出が可能になり、トラクタによる集材搬出は不要となる。したがってトラクタ道の密度は小さくすむ。しかし、一般には林道や作業道は、当該集材用に作設される場合は少なく、もっと広い領域を対象として配置されているため、当該集材区域にあったとしてもほとんどの場合その周辺や一部を通過する程度である。また仮に、林道や作業道が集材区域を横切るような場合でも、法高や法勾配などの関係から、直接林内からの搬出は不可能となる場合が少なくない。したがって、当該集材のためのトラクタ道は大なり小なり必要となる。

図 37 は、集材区域内に含まれる林道・作業道密度とトラクタ道密度の関係について伐採方法ごとに示したものである。図から、各伐採地とも林道・作業道密度が高くなるにしたがってトラクタ道密度は減少する傾向が認められる。しかし、林道・作業道密度の増大にともなうトラクタ道密

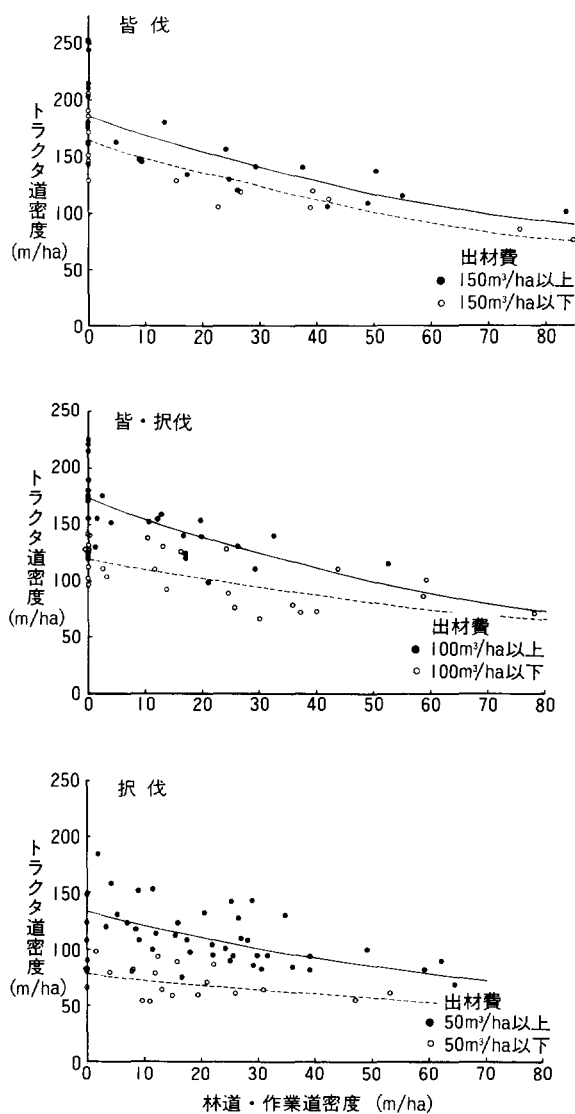


図 37. 林道・作業道密度とトラクタ道密度の関係

度の減少傾向はきわめて小さい。これらの関係は式 (2.94) のとおり指数関数で表された。

(皆伐地)

$$D = 164.2171 e^{-9.5926 E-3 \bar{D}} \quad (r = 0.9018) \quad (150 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ 以下})$$

$$D = 186.0712 e^{-9.1288 E-3 \bar{D}} \quad (r = 0.7924) \quad (150 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ 以上})$$

(皆・択伐地)

$$D = 119.9649 e^{-7.6012 E-3 \bar{D}} \quad (r = 0.6787) \quad (100 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ 以下})$$

$$D = 173.2992 e^{-10.9380 E-3 \bar{D}} \quad (r = 0.7094) \quad (100 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ 以上})$$

(2.94)

（択伐地）

$$\begin{aligned} D &= 78.4726 e^{6.3619 E-3 \bar{D}} \quad (r = 0.4860) && (50 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ 以下}) \\ D &= 133.1065 e^{-8.5669 E-3 \bar{D}} \quad (r = 0.6321) && (50 \text{ m}^3/\text{ha} \text{ 以上}) \end{aligned}$$

ただし、D：トラクタ道密度（m/ha）、 $\bar{D}$ ：林道・作業道密度（m/ha）。

図および式から、林道・作業道とトラクタ道の全体の路網密度は ha 当たりの出材量が多い皆伐地ほど高くなり、トラクタ道は林道・作業道の有無にかかわらず必要となる。ちなみにそれぞれの伐採地に対してみると、皆伐地では約 100 m/ha、皆・択伐地では約 70～80 m/ha、択伐地では約 50 m/ha 程度のトラクタ道密度が必要となることがわかる。

以上のように、林道・作業道の密度の大小は、トラクタ道の密度への影響もさることながら、土場の位置の選択およびその選択を介して集材路網の導入方法や配置あるいは形態に大きく関係することになる。こうした意味から林道・作業道密度の大小、あるいは林道・作業道の位置と集材区域の位置関係は集材路網の配置計画を立てる際の重要な評価値の一つとなる。

第三章 想定試験によるトラクタ集材路網の配置

第1節 緒 言

集材現場にトラクタ集材を導入する際、経済的に適切な集材作業を可能にし、しかも森林の環境破壊を最小限に抑えるためには集材の技術的工夫もさることながら、まず複雑多岐にわたる地形条件を克服した集材計画を立てることが必要であり、中心になるのは集材路網の配置計画と考えられる。

本章では、技術的かつ経済的なトラクタ集材を可能にするために、第1報および前章で明らかにした諸評価値を基に、地形・地表条件などとトラクタ集材路網の配置との関係について究明し、トラクタ集材計画の立案の際の判断基準について言及することを目的としている。

ここでは現状の集材手段とその技術を基にした想定モデルを立て、コンピュータ・シミュレーションを適用して、トラクタ集材路網の配置に関する諸々の関係について検討を行った。

第2節 トラクタ集材路網導入のための手法概要

トラクタ集材路網計画も、林道や作業道の場合と同様に類似条件の現場で比較実験ができない限り、（現実の問題→モデル化→O.R.の手法→問題の解決）という一般的な図式にしたがう方法をとることになる。ここでも現状の集材に関する評価値を基にしたモデルを立て、シミュレーション技法により考察した。

以下、モデル組み立てのための前提と仮定について概要する。

表 14 は、当該シミュレーションのパラメータおよび制約条件を示したものである。

2.1 集材林地モデルの設定

対象とする伐区は 200 m×100 m の矩形モデルとした。トラクタ集材作業に影響を与える林地条件は、第1報で論じたとおり地形傾斜、地表障害物、地表状態であり、表 14 に示すとおりそれぞれの条件を設定した。各因子の設定は第1報第三章と同様の方法である。

表14. 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	矩形 (200 m × 100 m)
	格子網間隔 (ϵ)	10 m
林地条件	地形傾斜 (平均傾斜 (θ))	0, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 25, 30°
	標準偏差 (σ)	5°
	地形の型	ランダム傾斜分布
	地表障害物 (障害物密度 (λ))	0, 0.075, 0.15
	障害物平均径 ($\bar{x}$)	0.5 (m)
	障害物の分布状態	ランダム分布 (R値≒1)
	地表 (地表状態 (粘着係数) (μ))	0.268, 0.364, 0.466, ∞
集材木関連	出材量	25, 50, 75, 100 (m ³ /ha) 1本当たりの材積 1 m ³
	集材木の分布	ランダム分布 (R値≒1)
既設土場関連	土場箇所	矩形の長辺上 (等間隔)
	土場数	1, 2, 3
トラクタ関連	トラクタ車両幅 (b)	1.5, 1 (m) 1回当たりの積載量 4本 (m ³)
	登坂能力 (α)	25°
	転倒安全角 (ψ)	15°
集材路網関連	木寄せ幅 (R)	10, 20, 30, 40, 50, 60 (m)
	集材路網形態 集材路網型	放射型, 単線型, 放射複合型, 樹枝型, 幹線樹枝型, 幹線魚骨型
	集材搬出方法	フリー集材走行タイプ, 併用集材走行タイプ, 路上集材走行タイプ
その他	1回当り積載量	4 m ³
	$\bar{Z}_1$: 導入係数	1.000
	$\bar{Z}_2$: 導入係数	0.001

また、集材量(出材量)は1本当たりの材積を1 m³とし、それぞれ25 m³/ha～100 m³/haを設定し、それぞれ対象区域内に50本～200本の集材木(伐倒木)をランダムに分布させ、その位置座標を与えた。図38はそれぞれの集材木の座標位置を示したものである。

さらに土場については、対象矩形伐区の長辺上の一辺に置き、それぞれ土場数1～3について、伐区面積を等分する位置に設定した。

2.2 トラクタ集材路網型の設定

トラクタ集材路網の形態は、前述のとおり大別して集中型路網、ランダム型路網および直線配列

集材量 25m³/ha

MHON=	50	WIDTH=	5.00
SAIKINREN TANI	0.0025	10.0000	10.3311 (1.0331)
INTERVAL X : 10.0000 Y : 10.0000			
90.000	1	.	.
80.000	12	.	.
70.000	1	.	.
60.000	1	.	.
50.000	1	.	.
40.000	1	.	.
30.000	1	.	.
20.000	1	.	.
10.000	1	.	.
0.	1	.	.
0.	50.0	100.0	150.0 200.0

集材量 50m³/ha

MHON=	100	WIDTH=	5.00
SAIKINREN TANI	0.0050	7.0711	7.2000 (1.0182)
INTERVAL X : 10.0000 Y : 10.0000			
90.000	1	.	.
80.000	12	.	.
70.000	1	2	.
60.000	1	.	.
50.000	1	.	.
40.000	1	.	.
30.000	1	.	.
20.000	1	.	.
10.000	1	.	.
0.	1	.	.
0.	50.0	100.0	150.0 200.0

集材量 75m³/ha

MHON=	150	WIDTH=	5.00
SAIKINREN TANI	0.0075	5.7735	5.7473 (0.9955)
INTERVAL X : 10.0000 Y : 10.0000			
90.000	1	.	.
80.000	12	.	.
70.000	1	3	2
60.000	12	.	.
50.000	1	.	.
40.000	12	.	.
30.000	1	.	.
20.000	1	.	.
10.000	12	.	.
0.	1	.	.
0.	50.0	100.0	150.0 200.0

集材量 100m³/ha

MHON=	200	WIDTH=	5.00
SAIKINREN TANI	0.0100	5.0000	5.3595 (1.0719)
INTERVAL X : 10.0000 Y : 10.0000			
90.000	1	.	.
80.000	12	.	.
70.000	1	3	2
60.000	12	.	.
50.000	1	.	.
40.000	12	.	.
30.000	12	.	.
20.000	1	.	.
10.000	12	.	.
0.	1	.	.
0.	50.0	100.0	150.0 200.0

図 38. 集材木の位置分布図

型路網に分類されるが、ここでは特に突込み型路網を中心に、それぞれ図 39 に示す 6 パターンの集材路網型を取り上げた。

各路網型の導入方法は次のとおりである。

＜放射型路網＞

導入ごとの始点が常に基点（土場）にあり、この基点を始点として対象林地に放射状に導入される路網。

＜単線型路網＞

導入ごとに始点が移動し、i 導入時の終点が (i+1) 導入時の始点となり、順次対象地内に導入される路網。

＜放射複合型路網＞

放射型路網と単線型路網の合成された路網である。第 2 回目以降の導入では少なくとも始点となる導入点は 2 個以上となり、対象地内に導入される路網。

＜樹枝型路網＞

導入ごとに始点となる導入点が増え、i 集材時の始点となりえる導入点は、(i-1) 回の導入によってできた通過点と終点および基点（土場）となり、これらのいずれかの導入点を次の始点として、順次対象地内に分枝して導入される路網。

＜幹線樹枝型路網＞

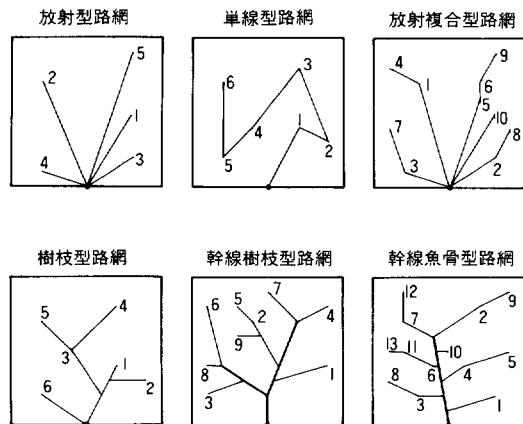


図 39. トラクタ集材路網型のモデル

一定の木寄せ幅内で集材が可能となるように集材路をあらかじめ対象地内に幹線路として設定し、この幹線路上の通過点と終点および基点（土場）を導入点として、順次樹枝型路網状に対象地内に導入される路網。

＜幹線魚骨型路網＞

幹線樹枝型路網と同様、あらかじめ幹線路を設定し、幹線路上の通過点と終点および基点（土場）を導入点とするが、幹線路から延びた支線路上の通過点は次の導入の始点とはならず、支線路は分枝することなく単線路で対象地内に導入される路網。

また、トラクタ集材路の作設方法の違いあるいは構造、規格の違いによるトラクタ集材路の種類として、表15に示すような集材路を設定した。

さらに、集材搬出方式の違いとして次のような3方法を設定した。

＜フリー集材走行タイプ（方式）＞

土工を必要とする集材路を設けなくて、自在路などの集材路により、直接土場と集材地点を往復して集材する場合。すなわち、集材路の作設人工数を必要としない場合である。このタイプとして、単線型、放射型路網に適用する。

＜併用集材走行タイプ（方式）＞

往路は登坂しやすい土工された集材路上を経由し、復路は下り勾配を自在路などの集材路により集材地点から直接土場へ集材する場合。このタイプとして、単線型、放射型およびその複合である

表15. 集材路の種類と規格および適用集材路網型

集材路の種類		集材路の規格		土工の有 無	摘 要	適用トラクタ集材路網型
		幅員(m)	縦断勾配(%)			
自在路 (藪出し路)		2～4	—	なし	トラクタが林内に自在に入った迂回走行経路あるいはトラクタ集材により林内に形成された道形。	単線型路網 放射型路網 放射複合型路網
作業路	支線	2～2.5	25°以下	なし	地表障害物の除去、整理あるいは支障木の伐開したトラクタ道。	単線型路網 放射型路網 放射複合型路網 樹枝型路網 幹線樹枝型路網 幹線魚骨型路網
	主線			あり	ブルドーザの排土板等により多少の地山の切り取り、地表表層部の排土や整地を施したトラクタ道。	
幹線作業路		3 m以下	18°以下	あり	低規格の作業道に準じた道であり、地山の切り取りや多少の盛土を施工し、軟弱地や湿地部に対し多少の工作物を施したトラクタ道。	幹線樹枝型路網 幹線魚骨型路網

放射複合型路網に適用する。

＜路上集材走行タイプ（方式）＞

往路、復路とも土工された集材路上を走行して集材する場合。このタイプとして、樹枝型、幹線樹枝型、幹線魚骨型路網に適用する。

また、これらの3タイプは道付けを必要とするかしないかによって前者の1タイプをフリーウェイ方式、後者の2タイプを道付け方式として区別した。

以上のように集材路の規格の違いおよび集材搬出方式の違いを考慮に入れたうえで集材路網の違いを模式的に分類すると図40のような集材路網型が考えられる。

2.3 集材積載量と集材路導入評価値

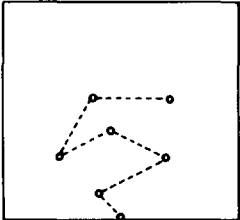
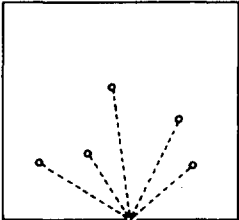
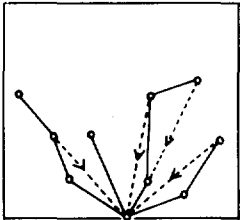
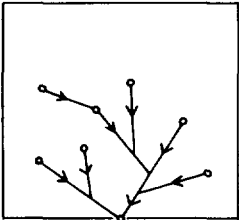
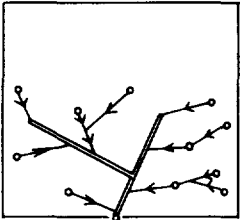
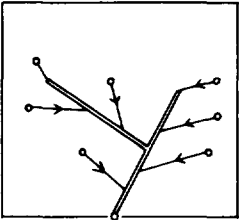
集材路 作 設	集材搬 出方式	ト ラ ク タ 集 材 路 網 型		集材路 の 種 類
道 付 け な し	フ リ ー 集 材 走 行 タ イ プ			自 在 路
		単 線 型	放 射 型	
道 付 け あ り	併 用 上 集 材 走 行 タ イ プ			自 作 在 業 路 路
	路 上 集 材 走 行 タ イ プ			
		幹 線 樹 枝 型	幹 線 魚 骨 型	作 幹 業 線 路 作 業 路

図 40. 集材搬出方式および集材路の種類からみた集材路網型の分類

トラクタが集材木を曳行する場合、直接曳行する場合とサルキーを用いる場合では、その積載量は違ってくる。一般にその積載量はトラクタ機種（エンジン出力、自重、走行装置の違い）と地形傾斜や地表状態（土質、含水率）によって決まる。トラクタの積載量は、トラクタが集材木を前後・左右方向から引き寄せても転倒しない条件⁶⁶⁾から集材木の重量を求めると、7tクラスのトラクタではほぼ3～4t（ホイールトラクタでは約3t、クローラトラクタでは約4t）となり、生木の集材木1t当たりの材積は樹種によって多少異なるが、ほぼ1m³に換算すると、1回当たりの積載量は3～4m³となる。すなわち、集材木1本当たり材積を1m³とすると1回当たりの積載本数は3～4本となる。

トラクタ集材路の導入径路の探索に対する評価値は、導入ごとの集材距離当たりの集材量の値を式(3.1)に示す集材指数 $W(I, J)$ で定義し、 $W(I, J)$ が最大となる径路を順次探索する手法を適用した。

$$W(I, J) = \frac{w_v N_i}{\{l_i(1+\eta_{vi})(1+\eta_{Hi}) + \bar{Z}_1\} + \bar{Z}_2 L_i} \times 100 \quad (3.1)$$

ただし、 w_v : 集材木1本当たり材積 (m³)、 N_i : i 導入時の集材本数、 l_i : i 導入時の新規路線の導入距離、 L_i : i 導入時の土場から新規路線の導入点までの距離、 η_{vi} : i 導入路線の地形の高低の迂回率、 η_{Hi} : i 導入路線の地表障害物による迂回率、 $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2$: 同一の $W(I, J)$ に対する導入路の補正係数である。また、地表障害物による迂回率 η_{Hi} は、既往文献⁶⁵⁾から、 $\eta_{Hi} = \frac{1}{100} e^{-0.75 \frac{1}{\sqrt{\lambda}} + 1.5\omega}$ で与えられた。ただし、 λ は、 l_i と l_j の路線の左右に対し $\frac{\varepsilon}{2}$ の幅 ($l_i \times 2 \cdot \frac{\omega}{2}$) 内の障害物密度、 $\omega = b + \bar{x}$ 、 b : トラクタ幅、 $\bar{x}$: 障害物平均径、 ε : 格子網間隔、である。

具体的にトラクタ集材路網導入の模式図を示すと図41のとおりである。

2.4 トラクタ集材路網導入のための制約条件

集材路が導入される径路の選定は、一般に次のような条件を考慮して決められる。

- ① 集材量（伐倒本数）の多い箇所に導入される。
- ② 地形が平坦かつ凹凸の少ない方向に導入される。
- ③ 地表障害物密度が疎の方向に導入される。
- ④ 地表状態の悪い箇所には導入され難い。
- ⑤ 非皆伐地では、稚樹や残存立木の少ない方向に導入される。

これらの目的関数に対して第1報および前章の結果から次のような制約条件を与えた。

- ① 導入ごとの新規路線の直線距離は一定の距離内であり、対象区域を出ないこと。（区間延長距離条件）
- ② 導入ごとの新規路線の始点・終点間の地形傾斜は登坂条件内であり、その通過点間の勾配も登坂条件を満たすこと。（登坂角条件）
- ③ 導入ごとの新規路線の横断方向の地形傾斜は、各通過点において転倒条件内であること。（転倒角条件）
- ④ 導入ごとの新規路線の一定の幅内の地表障害物密度は通行可能条件内であること。ここでは

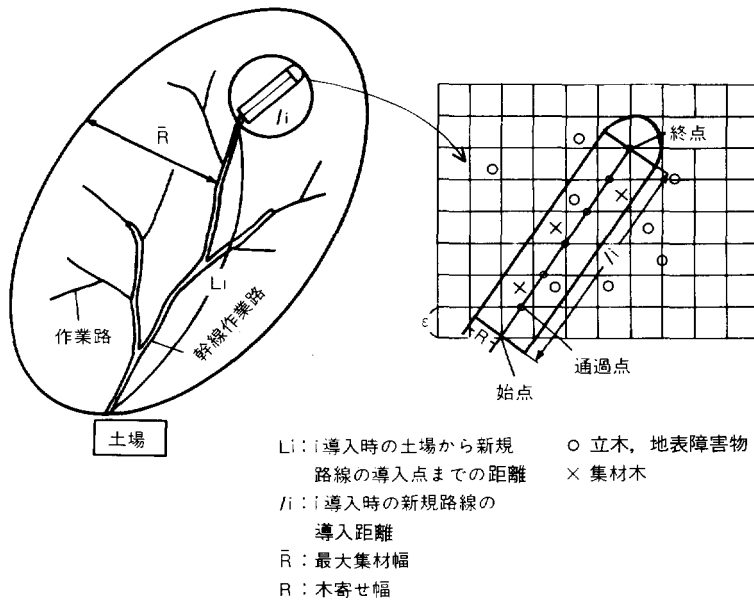


図 41. 集材路網導入の模式図

その幅は路線を中心に左右 $\frac{\varepsilon}{2}$ とし、(導入路線長 $\times\varepsilon$)の障害物密度が 0.15 個/ m^2 以下を与えた。(地表障害物通行条件)。ただし、 ε は格子網間隔である。

- ⑤ 既設集材路から分枝する新規集材路の導入角は、一定の角度を越えないこと。これは全幹、全木集材か普通集材かによって異なり、けん引材長によって決まる。(路線導入角条件)
- ⑥ 上荷集材を避けるため新規路線の導入勾配は順勾配を優先し、一定勾配以上の逆勾配にならないこと。(搭載けん引勾配条件)

これらの制約条件は、現場の地形条件や集材関連の条件ごとに異なってくる。

2.5 電算解法の手順

図 42 は電算解法の手順を示したものである。まず表 14 のパラメータを入力し、予備計算を行った後、立木、伐倒木およびその他地表障害物の位置座標を決定する。また、入力パラメータとして与えた平均傾斜と分散および傾斜方向の分布に従う地形モデルを作製し、集材区域を覆う格子網の各格子点の標高を算定する。各格子内に分布する立木と集材木などの標高は、共 1 次の内挿式により決定する。

これらの諸計算によって得られた対象林地に対し、入力データとして与えた土場位置に基点をおき、制約条件を満たす格子点の全点について、まず基点から予定路線を導入する。これらの予定路線に対して、集材指数 $W(I, J)$ を最大とする路線を検索する。探索された路線について導入距離、トラクタ走行距離、集材量等を算定する。以下、集材路網型ごとの導入方法にしたがって、対象地内へ路線を順次同様の操作で探索し、対象地内の集材木が集材できるまで繰り返し実行する。制約

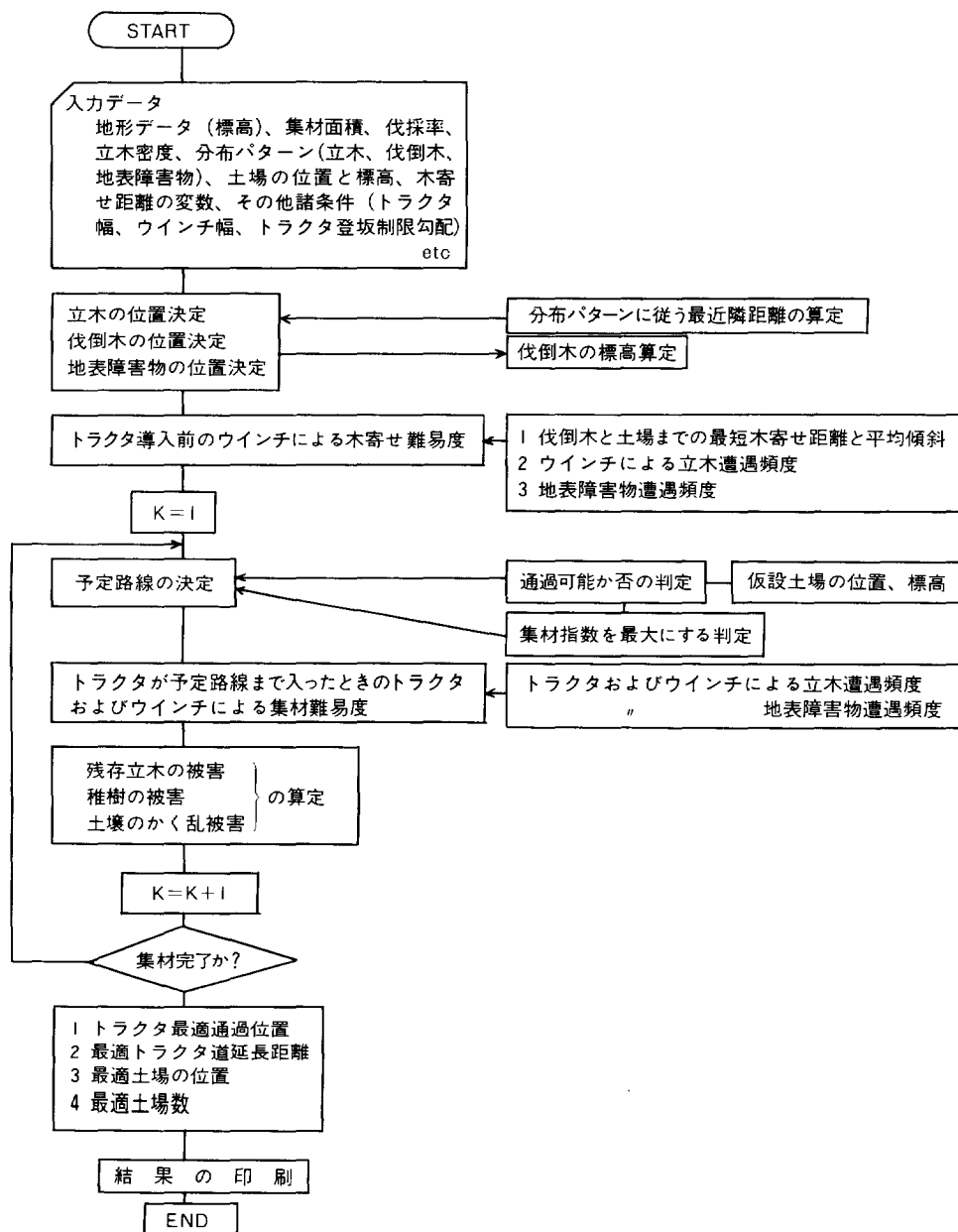


図 42. 電算解法のフローチャート

条件により、路線がそれ以上導入できなくなった時点で、この操作は完了し、この対象林地の評価値として、集材路網延長、トラクタ総走行距離、集材率(集材できた伐倒本数/全伐倒本数)などを算定する。また必要に応じて非皆伐地では、稚樹や残存立木の被害率などについても算定する。

これらの操作を、集材路網型ごとに行い、木寄せ幅や土場数のパラメータごとに繰り返し実行し、

表 16. トラクタ集材路網導入に関する記号と定義

記 号	名 称	定 義
S, S_A, m	集材面積 (ha)	S : 集材面積 (ha) S_A : 1 土場当たりの土場敷面積 (m^2) m : 土場数
N, W, w_v, w_s ($\bar{N}, \bar{W}$)	集材本数 集材材積 (m^3)	N : 集材本数 W : 集材材積 (m^3) w_v : 集材木 1 本当たり材積 (m^3) w_s : 積載量 (m^3) $\bar{N}$: ha 当たりの集材本数 $\bar{W}$: ha 当たりの集材材積
$\bar{D} (\ell_1)$	幹線作業路密度 (m/ha)	ℓ_1 : 幹線作業路延長 (m) $\bar{D} = \ell_1 / S$
$D (\ell_2)$	作業路密度 (m/ha)	ℓ_2 : 主線, 支線作業路延長 (m) $D = \ell_2 / S$
$\bar{R}$	最大集材幅 (m)	幹線作業路を作設時の最大到達距離
R, R_{10}	木寄せ幅 (m)	R : 集材毎の集材幅, 平均木寄せ距離は $R/2$ となる R_{10} : 木寄せ幅 10m
L	トラクタ総走行距離 (m)	トラクタが集材搬送した往復距離の総延長
n	トラクタ集材回数	L/n : トラクタが集材搬送した往復の平均集材走行距離, $n = W/w_s$
$\tau, \tau_{R=10}$	集材率	τ : 集材可能な集材木の割合 $\tau_{R=10}$: 木寄せ幅 10m の場合の集材率
η_1, η_2	迂回率	η_1 : 幹線作業路の迂回率 η_2 : 主線, 支線作業路の迂回率
η_d	路線変更補正係数	地表障害物により路線変更される補正值
$W(I, J)$	集材指数	集材路導入ごとの集材効率の評価値
$\bar{Z}_1, \bar{Z}_2$	路線導入係数	$\bar{Z}_1$: 同一 $W(I, J)$ に対し, 集材量の大きい箇所を優先するための導入路補正係数 $\bar{Z}_2$: 既設路上と未踏地上のトラクタ走行速度から求めた導入係数
T, T_L	集材所要人工数	T : 伐倒作業, 土場作業を一定とした集材所要人工数 T_L : 伐倒作業, 土場作業を一定とした ha 当たりの集材所要人工数
$\bar{a}_1 \sim \bar{a}_4$	要素作業毎の人工数	$\bar{a}_1$: 伐倒作業 (人工/ m^2) $\bar{a}_2$: 木寄せ・荷掛け作業 (人工/ m^2), $\bar{a}_3$: 集材搬出作業 (人工/ $m^2 \cdot m$), $\bar{a}_4$: 土場作業 (人工/ m^2)
$\bar{b}_1, \bar{b}_2$	要素作業毎の人工数	$\bar{b}_1$: 幹線作業路作設・補修 (人工/ m), $\bar{b}_2$: 主線, 支線作業路作設・補修 (人工/ m)
$\bar{c}$	要素作業毎の人工数	$\bar{c}$: 土場作設・補修 (人工/ m^2)
k_1, k_2	係 数	算出された各関係式の係数
$k_3, k_4, (\bar{k}_3, \bar{k}_4)$	係 数	算出された各関係式の係数
a_1, b_1	係 数	算出された各関係式の係数
a_2, b_2	係 数	算出された各関係式の係数

それぞれについて評価値を算定する。

各種の集材現場に対して, それぞれ現場条件の異なる想定林地を設定し, 以上の方法を繰り返し実行することにより, トラクタ集材路網の配置に係る諸関係について検討を行った。

以下, 本章および次章で適用された記号と名称について取りまとめると表 16 のとおりである。

第 3 節 林地条件とトラクタ集材路網の配置

対象区域内の伐倒木を、土場またはトラックの入る林道や作業道までトラクタにより集材搬出する場合、トラクタ集材路の延長距離が長ければ、ウインチによる木寄せ距離は短かくてすむことになる。しかし同一の集材路網延長であっても、その集材路網の配置の違いによって木寄せ距離は異なる。集材作業を効果的にするためには、集材路網密度を小さく、木寄せ距離を短かくすること、換言すれば、集材路網の配置を均一にすることが望ましいが、集材現場の諸条件によってその配置は多様に变化する。

以下、想定試験の結果から、集材路網と現場の諸条件の関係について明らかにした。

3.1 集材木の分布状態と集材路網の配置

集材木すなわち伐倒木の伐区内の分布状態は、天然林と人工林の違い、あるいは伐採方法の違いなど人為的な要素によって異なってくるが、通常、立木の配置によって決まる場合が少なくない。立木の分布状態は、第 1 報で論じたとおり、天然林ではランダムパターンとなり、人工林では拡散パターンに近い分布となる。ここでは、集材木が集材区域に、それぞれ集塊パターン、ランダムパターンおよび拡散パターンに分布した場合を取り上げ、集材路網の配置との関係について検討した。

図 43 は、集材木の分布状態の違いごとの平均木寄せ距離と集材路網密度の関係を示したものである。これは 4 ha の正方形伐区に集材木 100 本をそれぞれの分布状態にしたがうように集材木を配置させた場合の結果である。図から集材路網密度は、同一の平均木寄せ距離に対して、集材木の分布状態を表す R 値（最近隣単位、第 I 報参照）が小さいほど低くなり、R 値が大きいほど、高くなる。図中の破線は、式 (2.13) の集材路網配置指標 (f 値) を示したものであるが、集材木の分布状態がランダムパターン (R 値=1.0) の場合、各集材路網型とも、ほぼ f 値が $1 \sim \frac{\pi}{2}$ の範囲にプロットされている。しかし、集材路網の配置の偏りは、集材木の分布状態が拡散パターンになるにしたがって大きくなり、集塊パターンになるほど小さくなることがわかる。

また、集材路網型についてみると、それぞれの集材木の分布状態に対して、樹枝型路網が最も路網配置の偏りが小さく、放射型路網が最も大きい偏りを示すことがわかった。

3.2 平坦地形における集材路網の配置と集材路網型および土場数

図 44 は、平坦地（地形傾斜 0°）の場合の土場数 1、木寄せ幅 20 m の場合の各集材路網型の導入径路を示したものである。また図 45 は、平坦地、土場数 1 の場合の樹枝型路網について、木寄せ幅を変えた場合の導入径路を示したものである。これらの図から、平坦地の場合の集材路網密度と木寄せ幅の関係を集材路網型ごとに取りまとめて示すと図 46 のとおりである。前述の制約条件に対し、ここではそれぞれ ① 区間延長距離条件：100 m 以内、② 登坂角条件：25° 以下、③ 転倒角条件：15° 以下、④ 地表障害物通行条件：0.15 個/m² 以下、⑤ 路線導入角条件：90° 以内としたものである。ただし、搭載けん引勾配条件については考慮していない。また、図は集材量 50 m³/ha の場合のものであり、図中の一点破線は、幹線樹枝型および幹線魚骨型路網に関し、幹線作業路を除いた作業路だけの場合について示したものである。図 46 から、集材路網密度と木寄せ幅の関係は逆関数で表され、土場数 1 の場合の放射型路網以外の各路網型は、ほぼ f 値 = $1 \sim \frac{\pi}{2}$ の破

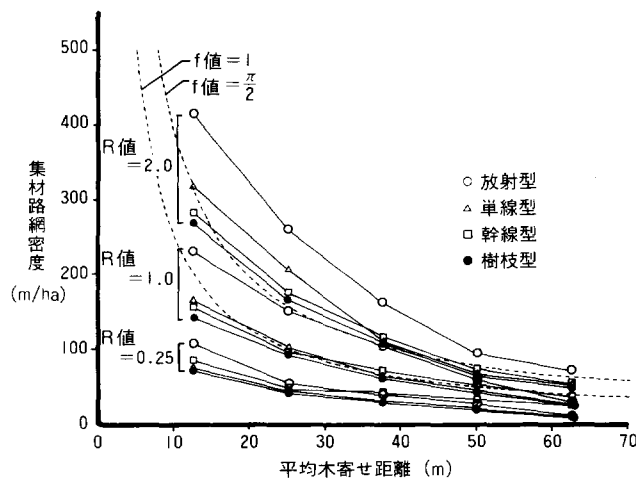
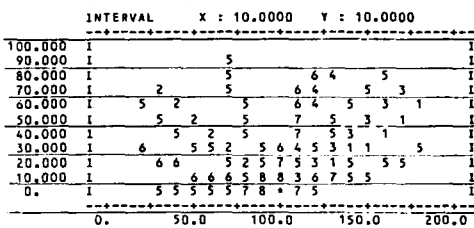


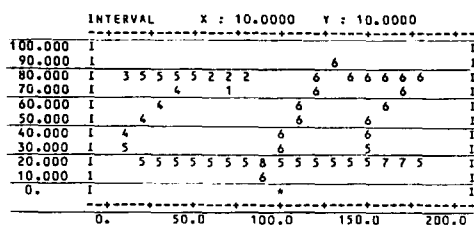
図 43. 集材木の分布状態の違いによる集材路網密度と平均木寄せ距離

土場 | 集材本数：100, $R=20\text{ m}$

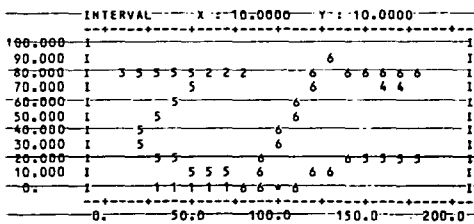
放射型路網



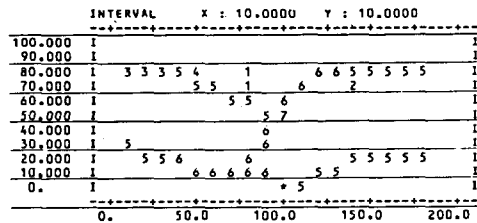
單線型路網



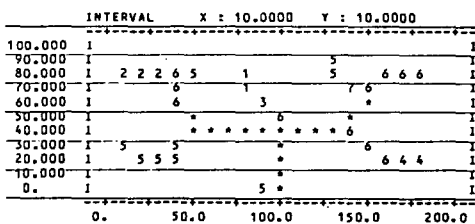
放射複合型路網



樹枝型路網



幹線樹枝型路網



幹線魚骨型路網

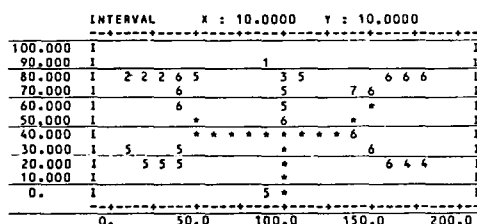
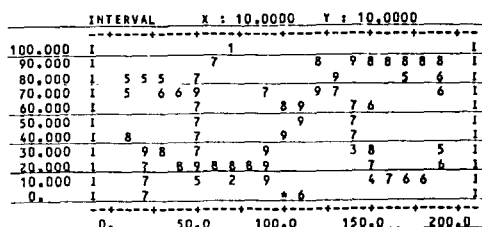
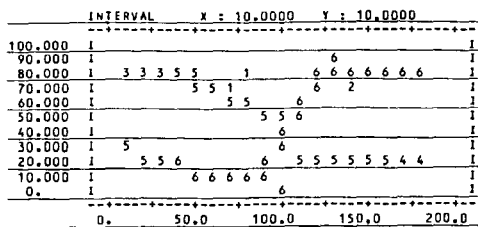


図 44. トラクタ集材路網型ごとの導入経路図（地形傾斜：0°，木寄せ幅：20 m，土場数：1 の場合）

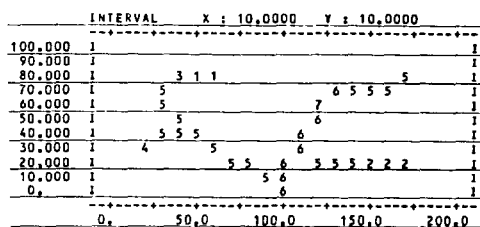
R=10m



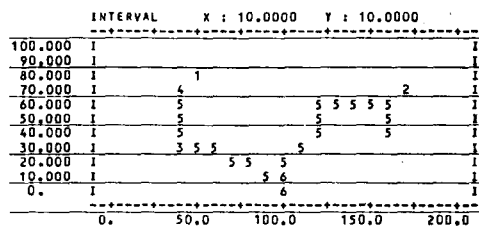
R=20m



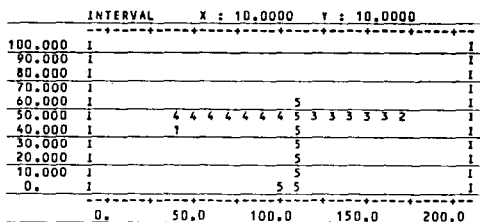
R=30m



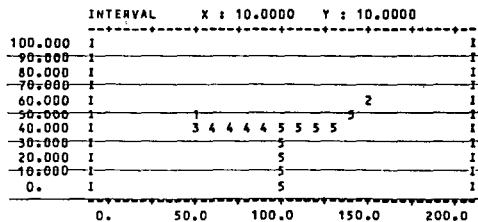
R=40m



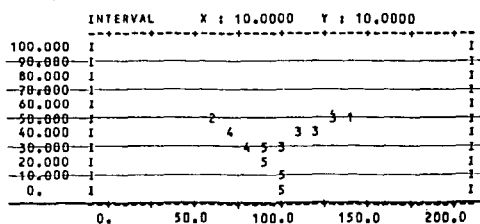
R=50m



R=60m



R=70m



R=80m

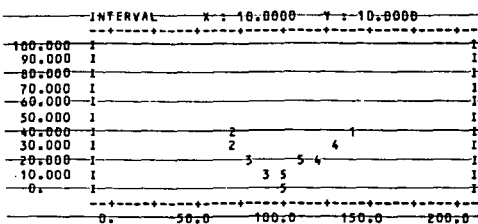


図 45. 地形傾斜 0° の場合の木寄せ幅ごとの集材路の導入径路 (樹枝型路網)

線で示す範囲内にプロットされている。これは、各路網型が均一～ランダムな路網配置であることを示している。集材路網型についてみると、樹枝型路網が最も f 値が小さく、均一に近い配置となり、幹線樹枝型、幹線魚骨型、放射複合型、単線型の順に f 値は大きく、放射型路網が最も大きい f 値を示した。

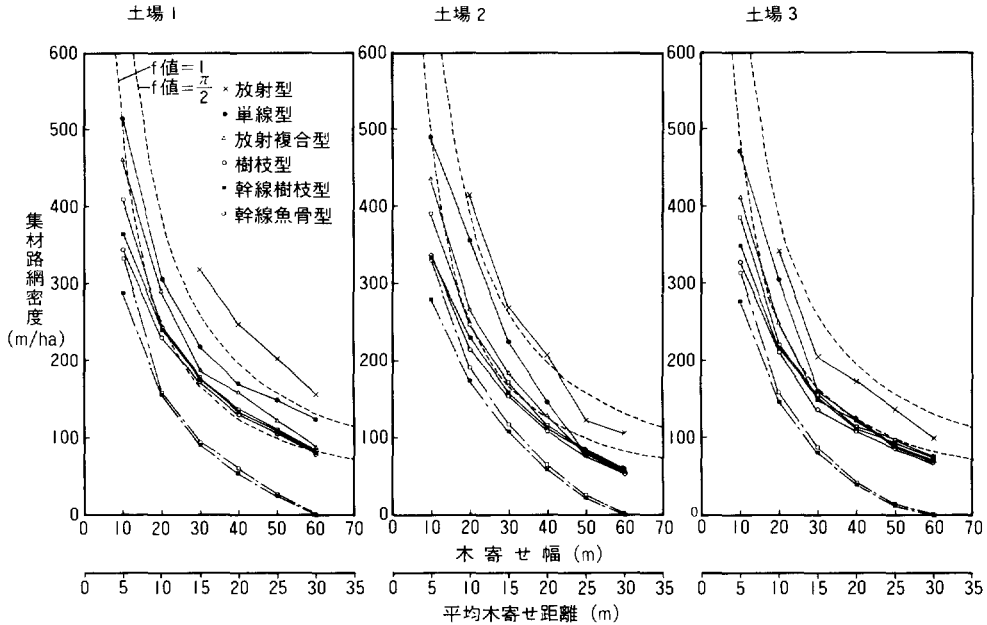


図 46. トラクタ集材路網密度と木寄せ幅および集材路網の配置 ($\theta = 0^\circ$)

また、土場数については、土場数が増えるほど、各集材路網型とも f 値は小さくなり、路網配置の偏りが小さくなることがわかった。

以上ここで論じた諸関係は、トラクタあるいは集材路が林内に容易に導入可能な地形的制約を受けない平坦地の場合である。しかし、地形傾斜が急になると、トラクタあるいは集材路は林内への導入が困難となる場合が考えられる。このような場合、木寄せ幅が小さいと、集材できない伐倒木が生ずることが想定される。

3.3 地形傾斜と集材率、木寄せ幅および集材路網密度

トラクタ集材路は地形が急になり、複雑になるほど、迂回率は大きくなる。したがってその路網密度は高くなる。しかし地形傾斜がさらに急峻になり、トラクタの登坂や転倒に対する条件を越えた林地では、トラクタ集材路の導入は、それ以上できなくなり、集材路網密度は結果として小さくなる。このようなところでは集材を実行可能にするためにはウインチによる木寄せ距離を長くする必要がある。しかし木寄せ距離が小さい場合は地形傾斜が急になると、集材不可能な面積あるいは集材できない伐倒木が生じることになる。

図 47 は土場数 1 の場合の地形傾斜別の集材率 τ と木寄せ幅 R および集材路網密度 D の関係を示したものである。なお、集材率とは全伐倒木に対する集材可能伐倒木の割合で定義し、以降は $\tau (0 \leq \tau \leq 1)$ で表すことにした。図から集材率は、地形が平坦なときは、各集材路網型ともほぼ 100% 集材可能となるが、地形傾斜が急になるにしたがって、集材率は減少すること。また木寄せ幅の増大による集材率の増加傾向は、幹線作業路を設けた幹線樹枝型や幹線魚骨型路網と幹線作業路

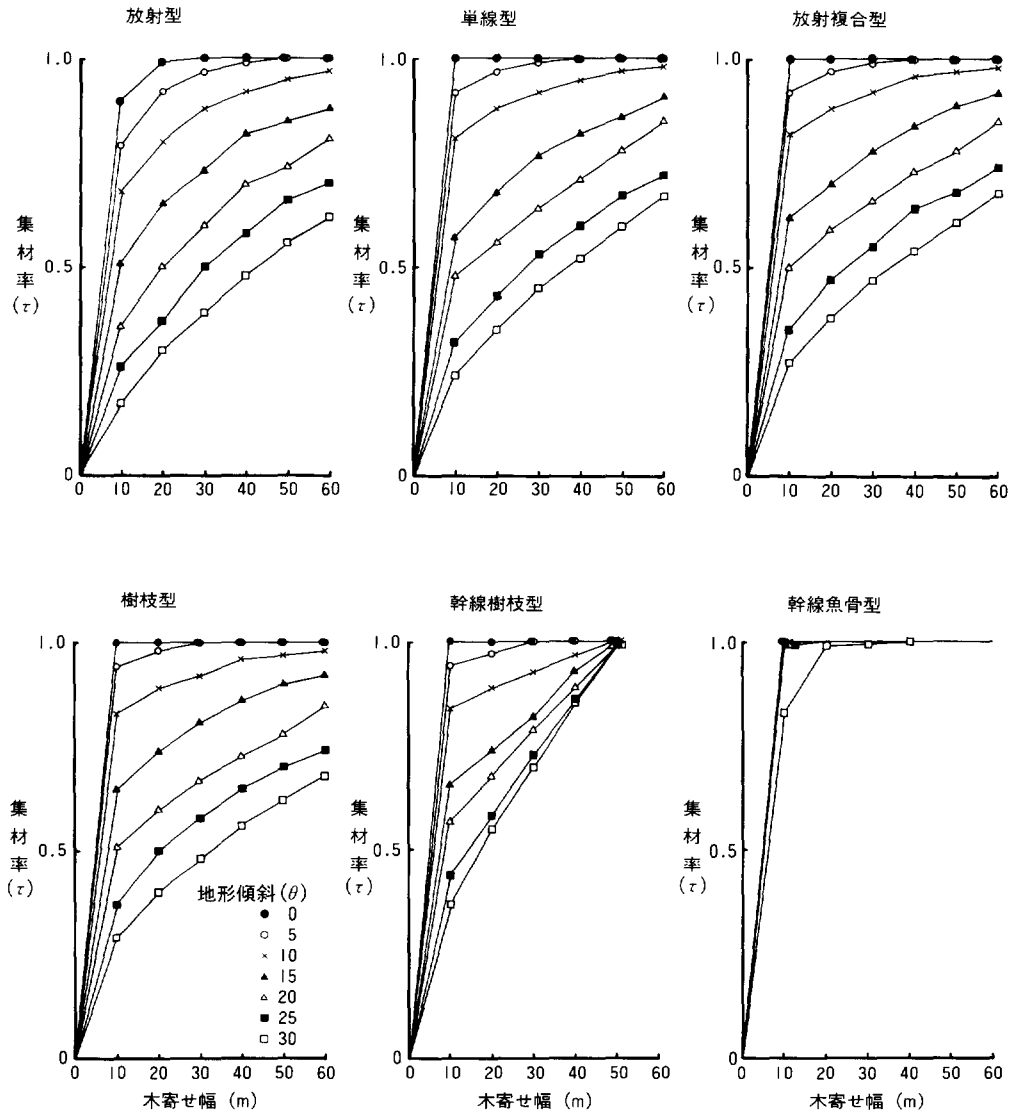


図 47. 地形傾斜と集材率および木寄せ幅の関係

を設けないほかの4路網型とは異なっていること、などがわかる。例えば放射型、単線型、放射複合型および樹枝型の各路網型では、地形傾斜が急な場合、木寄せ幅を大きくしても集材率の増加率は小さい。しかし幹線樹枝型では、木寄せ幅が小さいときの集材率は、前の4路網型に類似するが、木寄せ幅の増大にともない集材率は急増している。また、幹線魚骨型では、各地形傾斜および木寄せ幅に対してほぼ集材率は100%となる。

これらの関係から各集材路網型について地形傾斜 θ と集材率 τ および木寄せ幅 R の関係を算定した。ただし、幹線魚骨型路網ではほぼ $\tau=1$ となるので適用されていない。

まず、幹線作業路を設けない放射型、単線型、放射複合型および樹枝型についてみる。図 48 は、図 47 について縦軸に非集材率 $(1-\tau)$ 、横軸に木寄せ幅 R をとったものである。図からわかるように、 $(1-\tau)$ は、 R が大きいほど減少し、 $\ln(1-\tau)$ と R はほぼ直線の関係が認められる。また、 R の増大による $\ln(1-\tau)$ の減少傾向すなわち直線の傾きは、地形傾斜 θ の増大とともに小さくなる。これらの関係から、 R の増加に対する $\ln(1-\tau)$ の減少比と地形傾斜 θ の関係を示すと図

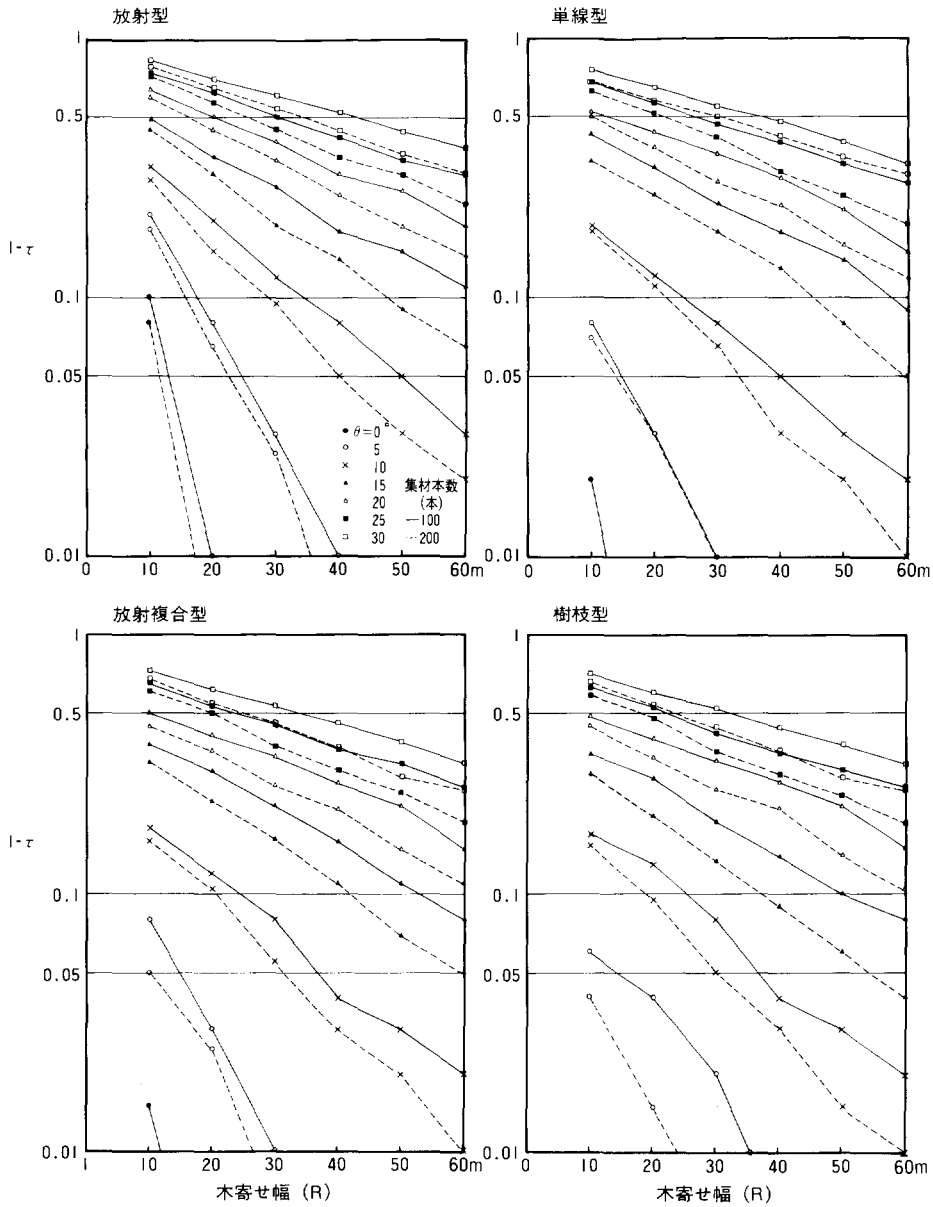


図 48. 集材率と木寄せ幅の関係（土場数 1 の場合）

49 のとおりである。図は縦軸に減少比 $\left\{ -\ln \frac{1-\tau}{1-\tau_{R=10}} / (R-R_{10}) \right\}$ をとり、横軸に θ をとったものである。ただし、 $\tau_{R=10}$ は木寄せ幅 10 m のときの集材率、 R_{10} は木寄せ幅 10 m である。図から減少比は地形傾斜が大きくなるにしたがって、指数的に減少することがわかる。土場数 1 の場合について各集材路網型について、これらの関係を求めると、式 (3.2) のとおりである。

放射型路網

$$\ln (t-0.015) = -1.7722 - 7.7831 \tan \theta \quad (r = -0.9350)$$

単線型路網

$$\ln (t-0.015) = -1.7839 - 8.5637 \tan \theta \quad (r = -0.9472)$$

放射複合型路網

$$\ln (t-0.015) = -2.1616 - 6.9370 \tan \theta \quad (r = -0.9008)$$

樹枝型路網

$$\ln (t-0.015) = -2.1057 - 6.9187 \tan \theta \quad (r = -0.8963)$$

(3.2)

ただし、 $t = -\left\{ \ln \frac{1-\tau}{1-\tau_{R=10}} / (R-R_{10}) \right\}$ である。

また、木寄せ幅 10 m (R_{10}) のときの集材率 $\tau_{R=10}$ と地形傾斜 θ の関係について示すと図 50

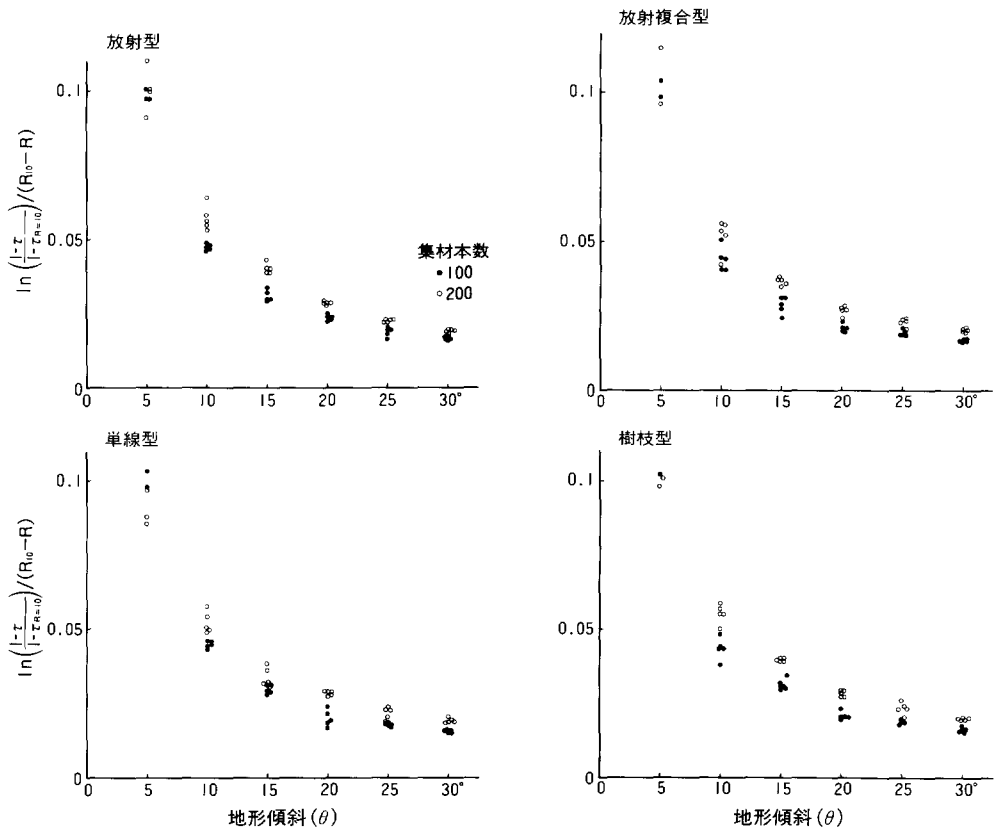


図 49. 木寄せ幅の増大にともなう $\ln (1-\tau)$ の減少比と地形傾斜の関係

のとおりである。図は縦軸に $\ln\left(\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right)$ をとり、横軸に θ をとったものであるが、各集材路網型とも $\ln\left(\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right)$ は、 θ が大きくなるにしたがって小さくなり、縦軸の値の対数値 $\ln\left\{\ln\left(\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right)\right\}$ は、 θ に対して、直線式で近似できる。また各集材路網型は、ほぼ同一の直線勾配となる。さらに各地形傾斜に対する $\ln\left\{\ln\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right\}$ の値は、放射型路網が最も小さく、樹枝型路網が最も大きいことがわかる。これらの関係は、土場数 2 および 3 についても、ほぼ同様の関係が示された。土場数 1 について、これらの関係を算定すると、次のとおりである。ただし、相関係数は、各集材路網型を $\theta=30$ において、樹枝型路網の点に平行移動してプロットした場合の 4 集材路網型についてのものである。

放射型路網

$$\ln\left\{\ln\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right\} = 0.8893 - 4.3155 \tan \theta$$

単線型路網

$$\ln\left\{\ln\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right\} = 1.2404 - 4.3155 \tan \theta$$

放射複合型路網

$$\ln\left\{\ln\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right\} = 1.3164 - 4.3155 \tan \theta$$

樹枝型路網

$$\ln\left\{\ln\frac{1}{1-\tau_{R=10}}\right\} = 1.3774 - 4.3155 \tan \theta \quad (r = -0.9895)$$

(3.3)

そこで、式 (3.3) の $\tau_{R=10}$ を式 (3.2) に代入すると、式 (3.4) のとおり地形傾斜 θ と集材率 τ および木寄せ幅 R の関係が得られる。

放射型路網

$$\ln(1-\tau) = (R_{10} - R) \{0.015 + 0.1700 e^{-7.7831 \tan \theta}\} - 2.4334 e^{-4.3155 \tan \theta}$$

単線型路網

$$\ln(1-\tau) = (R_{10} - R) \{0.015 + 0.1680 e^{-8.5637 \tan \theta}\} - 3.4570 e^{-4.3155 \tan \theta}$$

放射複合型路網

$$\ln(1-\tau) = (R_{10} - R) \{0.015 + 0.1151 e^{-6.9370 \tan \theta}\} - 3.7300 e^{-4.3155 \tan \theta}$$

(3.4)

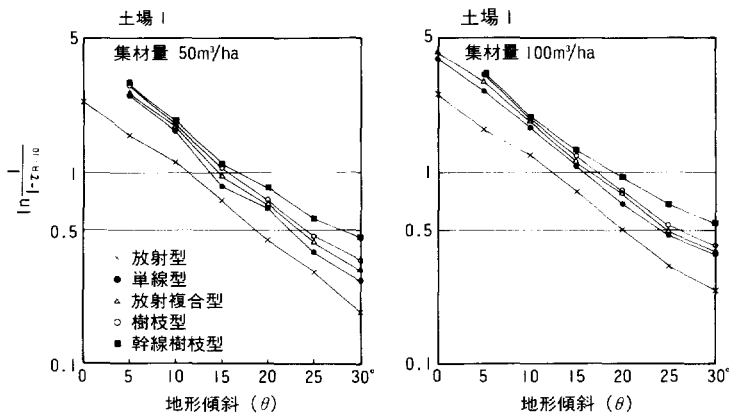


図 50. 木寄せ幅 10 m の場合の集材率と地形傾斜の関係

樹枝型路網

$$\ln(1-\tau) = (R_{10} - R) \{ 0.015 + 0.1218 e^{-6.9187 \tan \theta} \} - 3.9646 e^{-4.3155 \tan \theta}$$

また、幹線樹枝型に関しては後章で詳述するが、ここで取り上げた最大集材幅 $\bar{R}=60$ m の場合 (ウインチによる木寄せ幅の最大が 60 m 以内となるように幹線作業路を配設した場合) では、図 47 のとおり、木寄せ幅 10 m 以上では、各地形傾斜とも木寄せ幅の増大とともに集材率は直線的

に増加している。そこで木寄せ幅の増大にともなう集材率の増加比 $\left(\frac{\tau - \tau_{R=10}}{R - R_{10}} \right)$ と地形傾斜 θ の関係を示すと図 51 のとおりである。また木寄せ幅 10 m のときの集材率 $\tau_{R=10}$ と θ の関係は、図 50 に示したとおりであり、これらの関係から地形傾斜 θ と集材率 τ および木寄せ幅 R の関係を算定すると次式 (3.5) のとおりである。

$$\tau = 0.0282 (R - R_{10}) \tan \theta + \left\{ 1 - e^{-3.9646 e^{-4.0402 \tan \theta}} \right\} \quad (3.5)$$

ここで示した諸関係は、各集材路網型とも土場数 2 および 3 の場合でも類似した関係となり、土場数が増えるにしたがって、同一地形傾斜および同一木寄せ幅に対して集材率は多少大きくなる傾向が示されたが、ほぼ土場数 1 の場合で代表できることがわかった。

さらに集材路網密度 D と木寄せ幅 R および集材率 τ の関係についてみる。図 52 は各集材路網型について集材率を集材路網密度で割った値 $\frac{\tau}{D}$ と木寄せ幅 R の関係を示したものである。図から $\frac{\tau}{D}$ は、 R が大きくなるにしたがって対数的増加傾向を示し、各集材路網型に対し、次式のような一般式が与えられた。

$$D = \frac{\tau}{k_1} e^{-k_2 R} \quad (3.6)$$

k_1, k_2 はそれぞれの集材路網型ごと

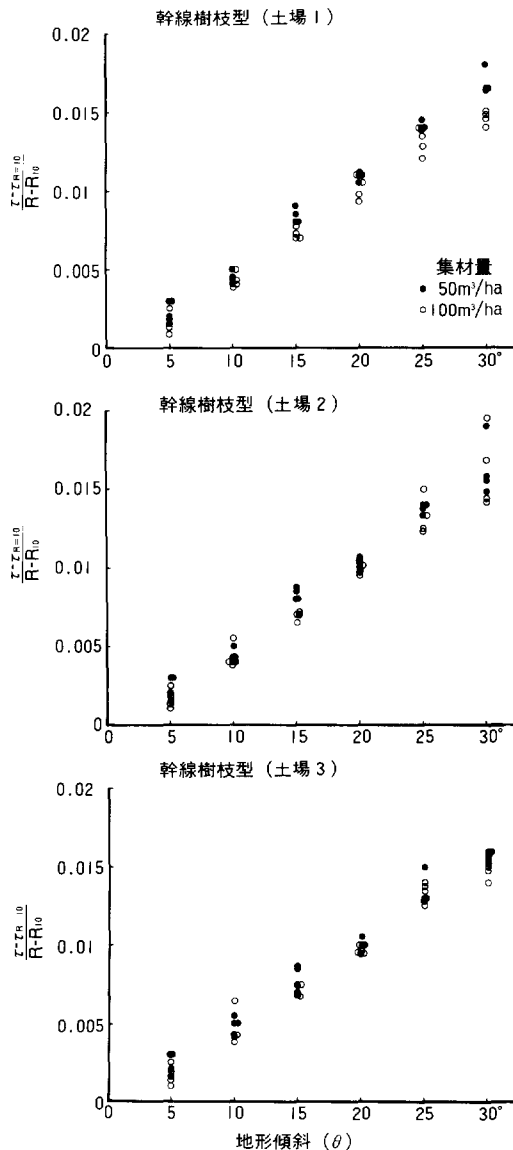


図 51. 木寄せ幅の増大にともなう集材率と地形傾斜の関係 (最大集材幅 (R) = 60 m の場合)

の係数である。係数 K_1, k_2 について土場数 1~3 の場合について算定すると表 17 のとおりである。式 (3.6) に関して、 $\tau=1$ のときの木寄せ幅 R と集材路網密度 D の関係を示すと図 53 のとおりである。

以上の述べたとおり、集材率 τ は、地形傾斜 θ 、木寄せ幅 R および集材路網密度 D に関係し、式 (3.4)、(3.5) と式 (3.6) から、 τ と、 θ, R, D には 4 元の関係式が成り立つことがわかった。

図 54 は、これらの関係を図示したものである。図は縦軸に集材率、横軸に集材路網密度をとり、地形傾斜ごとの木寄せ幅と集材路網密度に対する集材率の関係を示しているが、図から次のことがわかる。地形傾斜が平坦な場合は、集材路の林内導入は容易のため路網密度は高くすることができる。したがって、木寄せ幅を小さくしても集材率は、ほぼ 100% を満たすこと。しかし、地形傾斜が急な場合は、集材路の林内導入は困難となり、路網密度は低くなる。したがって一定の集材率を確保するためには、木寄せ幅をある一定の長さ以上にする必要があること、などである。要するに、各地形傾斜に対して一定の集材率を確保するための木寄せ幅と集材路網密度は、図 54 を適用することにより簡易に求めることができる。

表 18 は、地形傾斜ごとに集材率 90% ($\tau=0.9$) と 95% ($\tau=0.95$) 以上を確保するための必要な木寄せ幅について示したものである。なお、この木寄せ幅を以降では最小木寄せ幅と呼ぶことにした。表から最小木寄せ幅は、地形傾斜が急になるほど大きくする必要があることがわかる。ま

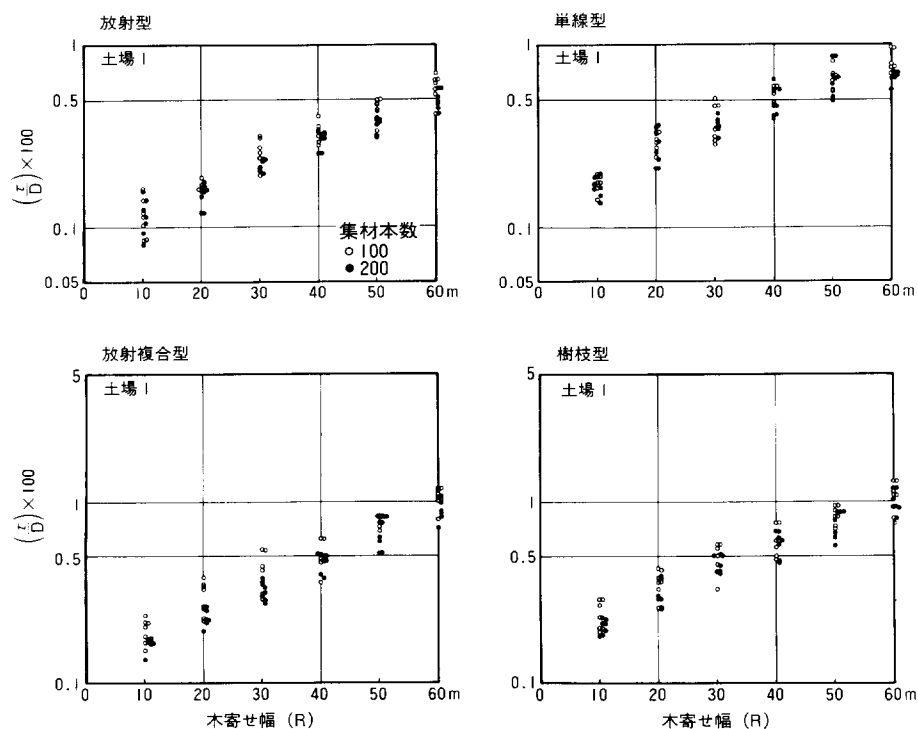


図 52. 集材路網密度と木寄せ幅および集材率の関係

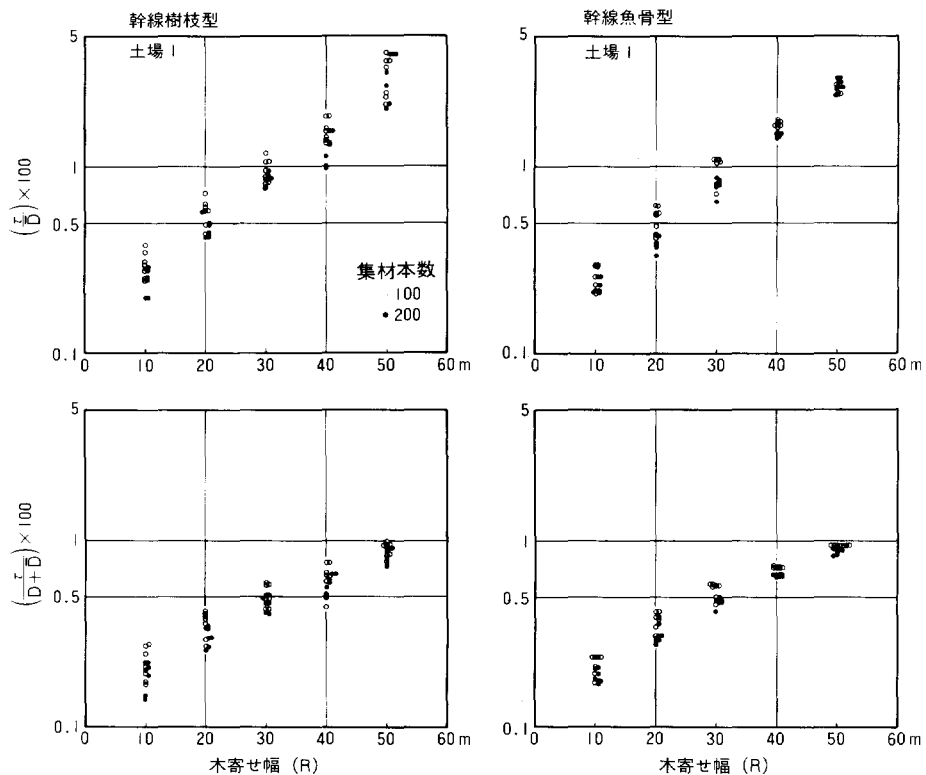


図 52. (つづき)

た、これらの関係は集材路網型によって異なり、集材率を確保するための最小木寄せ幅が最も小さくつむ路網型は、幹線作業路を並設した幹線魚骨型や幹線樹枝型となり、放射型路網は、最も大きい最小木寄せ幅を必要とした。さらに土場数の違いについては、ほとんど土場数に関係なく、土場数1の場合で代表できることがわかった。

3.4 地表障害物の密度と集材路網密度

集材路を林内に導入する場合、集材路線は集材指数 $W(I, J)$ の大きいところに導入されるが、その導入路線の地表障害物の密度が大きいとそこへの導入は困難か不可能となり、導入路線は、次に大きい集材指数を与える箇所を選定して導入されることになる。したがって地表障害物の密度が高い林地では、変更箇所の導入路線が多くなり、短区間の導入路線数が増えることから当然迂回率は大きくなり、集材路網密度は高くなると同時に集材路網の配置も偏りが大きくなる。しかし、地表障害物の影響は、地形傾斜の場合と異なり、障害物の密度がきわめて高く、林地全体を被覆する場合を除いては、林内への集材路の導入が全く不可能となることは少なく、集材路網の延長距離は長くなるが集材率への影響は小さいと考えられる。

図 55 は、図 50 の木寄せ幅 10 m の集材率 $\tau_{R=10}$ と地形傾斜 θ の関係について、地表障害物密度 λ を 0, 0.075, 0.15 個/ m^2 とした場合のそれぞれの関係を示したものである。図から、地表

表 17. 集材路網密度と木寄せ幅およびトラクタ総走行距離と集材路網密度に関する関係式の各係数

	集材路網 パターン	k_1	k_2	択 伐(50m ³ /ha)		皆 伐(100 m ³ /ha)	
				k_3	k_4	k_3	k_4
土 場 1	放 射 型	0.0868E-2	0.0309	5.9279	324.878	12.3550	745.395
	単 線 型	0.1454E-2	0.0300	30.8119 (7.6270)	-1554.340 (668.774)	58.5974 (13.2645)	-2957.700 (1805.243)
	放射複合型	0.1288E-2	0.0338	12.3081	263.327	21.0204	1101.593
	樹 枝 型	0.1757E-2	0.0299	20.2822	-170.210	34.9573	610.384
	幹線樹枝型	0.1565E-2 (0.1533E-2)	0.0346 (0.0583)	23.5581	253.594	23.2949	5096.563
	幹線魚骨型	0.1596E-2 (0.1239E-2)	0.0351 (0.0655)	17.4115	1766.080	22.1138	6277.313
土 場 2	放 射 型	0.0993E-2	0.0392	6.2159	213.225	10.4985	582.296
	単 線 型	0.1244E-2	0.0408	16.3498 (6.1046)	-454.993 (413.946)	30.4818 (10.5425)	-903.455 (957.363)
	放射複合型	0.1320E-2	0.0405	12.3442	-194.672	15.8778	636.903
	樹 枝 型	0.1612E-2	0.0377	16.6200	-343.384	23.1849	322.418
	幹線樹枝型	0.1490E-2 (0.1440E-2)	0.0410 (0.0587)	13.0713	358.962	20.6855	1474.113
	幹線魚骨型	0.1460E-2 (0.1210E-2)	0.0420 (0.0635)	11.2365	964.473	19.6194	2473.425
土 場 3	放 射 型	0.1141E-2	0.0356	5.3406	192.159	10.0686	490.435
	単 線 型	0.1387E-2	0.0376	12.7341 (6.2890)	-263.948 (286.372)	26.6520 (10.4700)	-925.118 (848.213)
	放射複合型	0.1498E-2	0.0365	10.4746	-92.346	16.8523	243.646
	樹 枝 型	0.1832E-2	0.0334	15.6671	-372.857	26.2810	-431.579
	幹線樹枝型	0.1672E-2 (0.1368E-2)	0.0367 (0.0713)	16.3358	-51.755	18.8216	1002.124
	幹線魚骨型	0.1742E-2 (0.1228E-2)	0.0362 (0.0722)	13.7371	651.824	18.6626	1633.938

$$\text{注) } D = \frac{(1 + \eta \lambda)}{k_1} e^{-k_2 R} \quad L = k_3 D + k_4$$

障害物密度の違いによる集材率の影響は、地形傾斜の影響に比べて小さい。また集材路網型別にみると、幹線樹枝型や幹線魚骨型路網では勿論のこと、樹枝型、放射複合型路網でも、ほとんど障害物密度による集材率への影響は小さいことがわかる。単線型および放射型路網では、障害物密度が 0.075 個/m² のときは、障害物密度 0 のときに比べ集材率は 1～3% 小さくなり、障害物密度が 0.15 個/m² では約 10% 小さくなっている。しかしこれらの関係は、木寄せ幅 10 m の場合であり、木寄せ幅が大きくなると障害物密度がかなり高い場合でも集材率への影響は、ほとんど無いことがわかる。

図 56 は、地表障害物密度の違いによる木寄せ幅 R と集材路網密度 D および集材率 τ の関係を示したものである。地表障害物が全く無い場合 ($\lambda=0$) の R と $\frac{\tau}{D}$ の関係についてはすでに図 52 や式 (3.6) に示したとおり、 $\ln \frac{\tau}{D}$ と R には直線関係が与えられたが、地表障害物密度

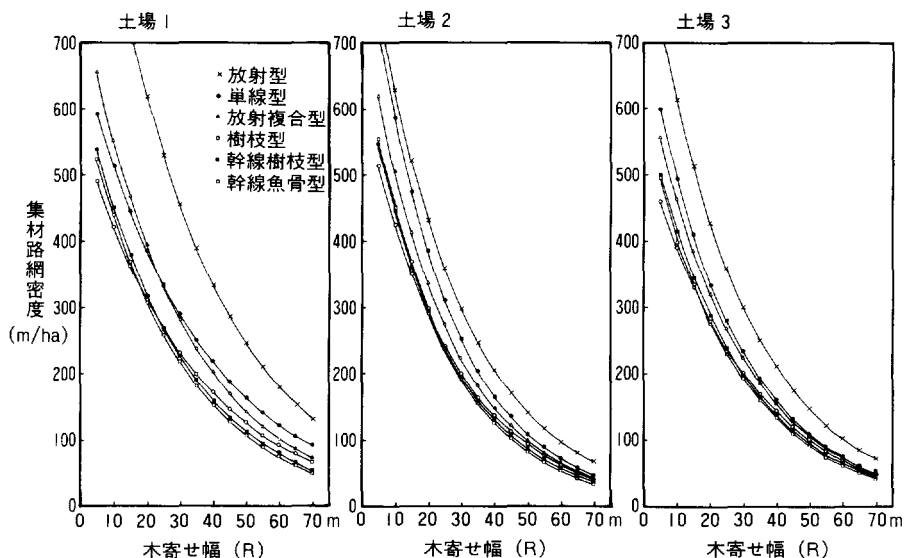


図 53. 集材率 100% ($\tau=1$) の場合の木寄せ幅と集材路網密度

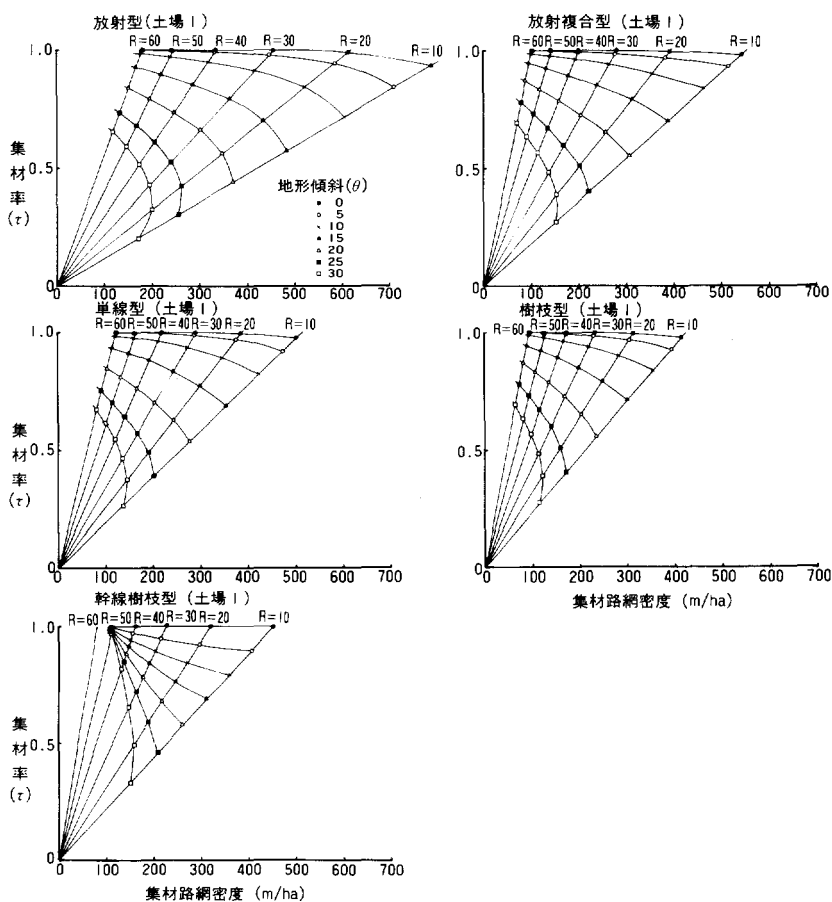


図 54. 地形傾斜, 木寄せ幅, 集材路網密度および集材率の関係

表 18. 集材率（90%および95%）を確保するための最小木寄せ幅

土場数		地形傾斜%	放射型	単線型	放射複合型	樹枝型	幹線樹枝型	幹線魚骨型
集材率 90% 確保	1	0	9.29	3.69	0	0	0	0
		10	17.76	10.66	8.35	6.42	0	0
		20	35.12	28.64	26.65	23.85	22.56	0
		30	62.00	58.63	53.62	50.17	34.51	0
		40	92.87	92.43	83.89	80.51	41.46	0
		50	119.26	119.99	110.61	108.10	44.83	0
	2	0	6.27	0.59	0	0	0	0
		10	16.82	9.20	7.49	6.61	0	0
		20	35.18	28.23	25.53	23.24	22.34	0
		30	60.67	56.97	52.21	48.90	34.08	0
		40	88.78	88.69	82.39	79.11	40.92	0
		50	113.74	115.16	109.48	107.07	44.10	0
	3	0	4.82	0.45	0	0	0	0
		10	15.30	8.53	7.33	6.66	0	0
		20	33.63	26.32	23.82	23.10	22.21	0
		30	59.18	54.00	49.52	48.69	33.83	0
		40	87.42	85.58	79.85	78.96	40.60	0
		50	112.68	112.88	107.57	106.76	43.87	0
集材率 95% 確保	1	0	13.04	7.48	4.36	2.92	0	0
		10	25.22	18.70	17.91	15.54	17.40	0
		20	48.76	43.94	42.47	39.08	31.42	0
		30	84.03	83.50	77.23	73.06	40.42	0
		40	123.59	126.29	115.14	111.11	45.90	0
		50	156.72	160.06	147.88	144.97	48.37	0
	2	0	11.70	5.34	3.64	3.37	0	0
		10	26.31	18.74	16.96	15.23	17.27	0
		20	50.61	44.65	41.18	37.80	31.05	0
		30	83.45	81.88	75.53	71.06	39.89	0
		40	118.99	121.64	113.33	109.10	45.27	0
		50	150.03	153.88	146.54	143.55	47.57	0
	3	0	10.33	5.11	3.46	3.40	0	0
		10	24.87	17.40	15.78	15.16	17.20	0
		20	49.13	41.75	38.23	37.52	30.83	0
		30	82.01	77.76	71.63	70.73	39.58	0
		40	117.62	117.52	109.89	108.88	44.91	0
		50	148.96	150.96	144.05	143.13	47.31	0

が大きくなると、 R と $\ln \frac{\tau}{D}$ の関係は、縦軸を下方に平行移動した関係となる。言い換れば地表障害物密度が λ の時の集材路網密度は、障害物密度が 0 の場合の集材路網延長に障害物密度による増分距離を加えた関数として表すことができる。

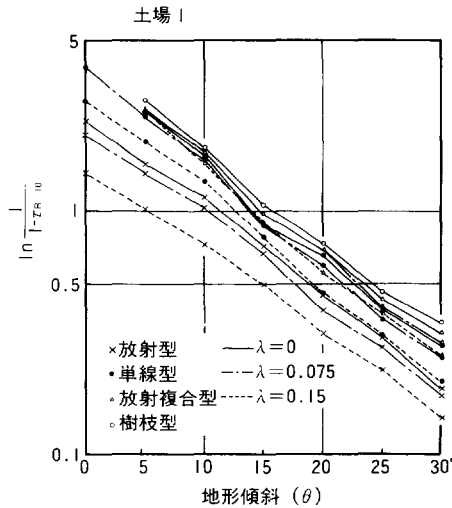


図 55. 地表障害物密度ごとの木寄せ幅 10 m の集材率と地形傾斜との関係 (集材本数 100 本の場合)

表 19. 地表障害物による集材路
線変更補正係数 (η_λ)

地表障害物 密度 λ	0	0.075	0.15
集材路網型			
放射型	0	0.069	0.224
単線型	0	0.066	0.187
放射複合型	0	0.056	0.161
樹枝型	0	0.047	0.131
幹線樹枝型	0	0.046	0.124
幹線魚骨型	0	0.050	0.150

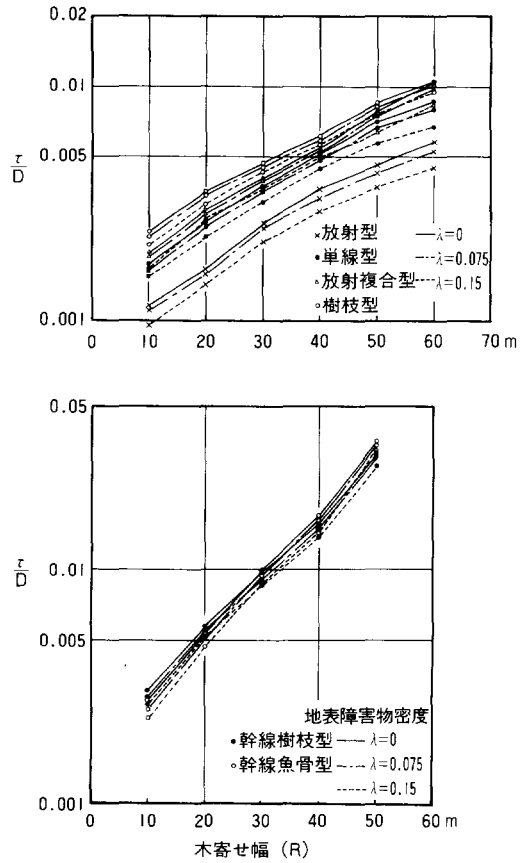


図 56. 地表障害物密度ごとの集材率と木寄せ幅および集材路網密度

そこで、地表障害物密度による補正値を η_λ とし、障害物密度が 0 の場合の集材路網延長に対する増分距離の比で表すと、図 56 および式 (3.6) から

$$\ln \frac{\tau}{D}_{\lambda=0} = \ln k_1 + k_2 R \quad (3.7)$$

$$\ln \frac{\tau}{D}_{\lambda=\lambda} = \ln k_1 + k_2 R - \xi \quad (3.8)$$

$$\eta_\lambda = \frac{D_{\lambda=\lambda} - D_{\lambda=0}}{D_{\lambda=0}} = e^\xi - 1 \quad (3.9)$$

$$\therefore \xi = \ln (1 + \eta_\lambda) \quad (3.10)$$

となり、地表障害物密度 λ のときの集材路網密度と木寄せ幅 R および集材率 τ の一般式は次式 (3.11) で表されることになる。

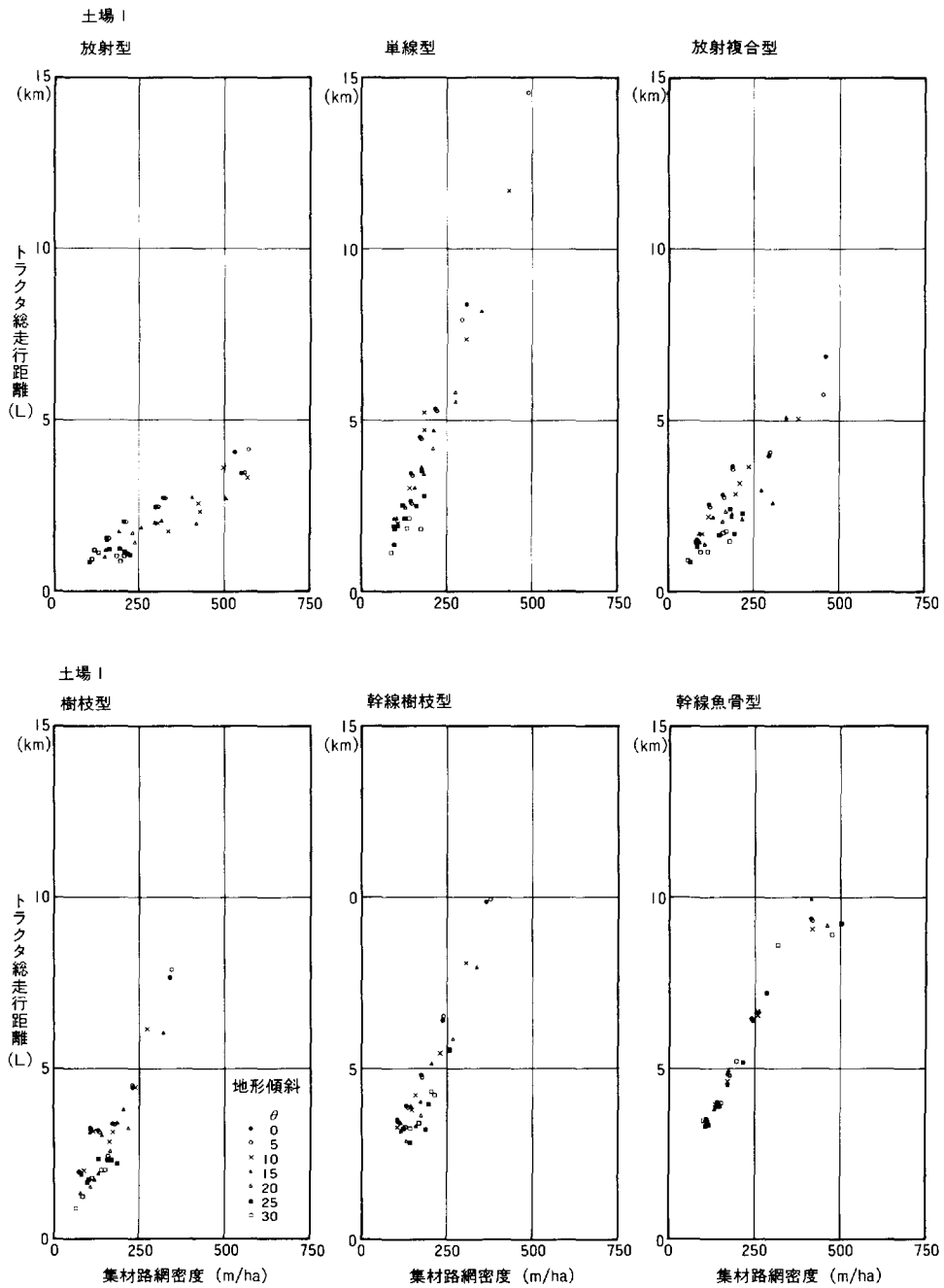


図 57. トラクタ総走行距離と集材路網密度 (集材本数 100 本の場合)

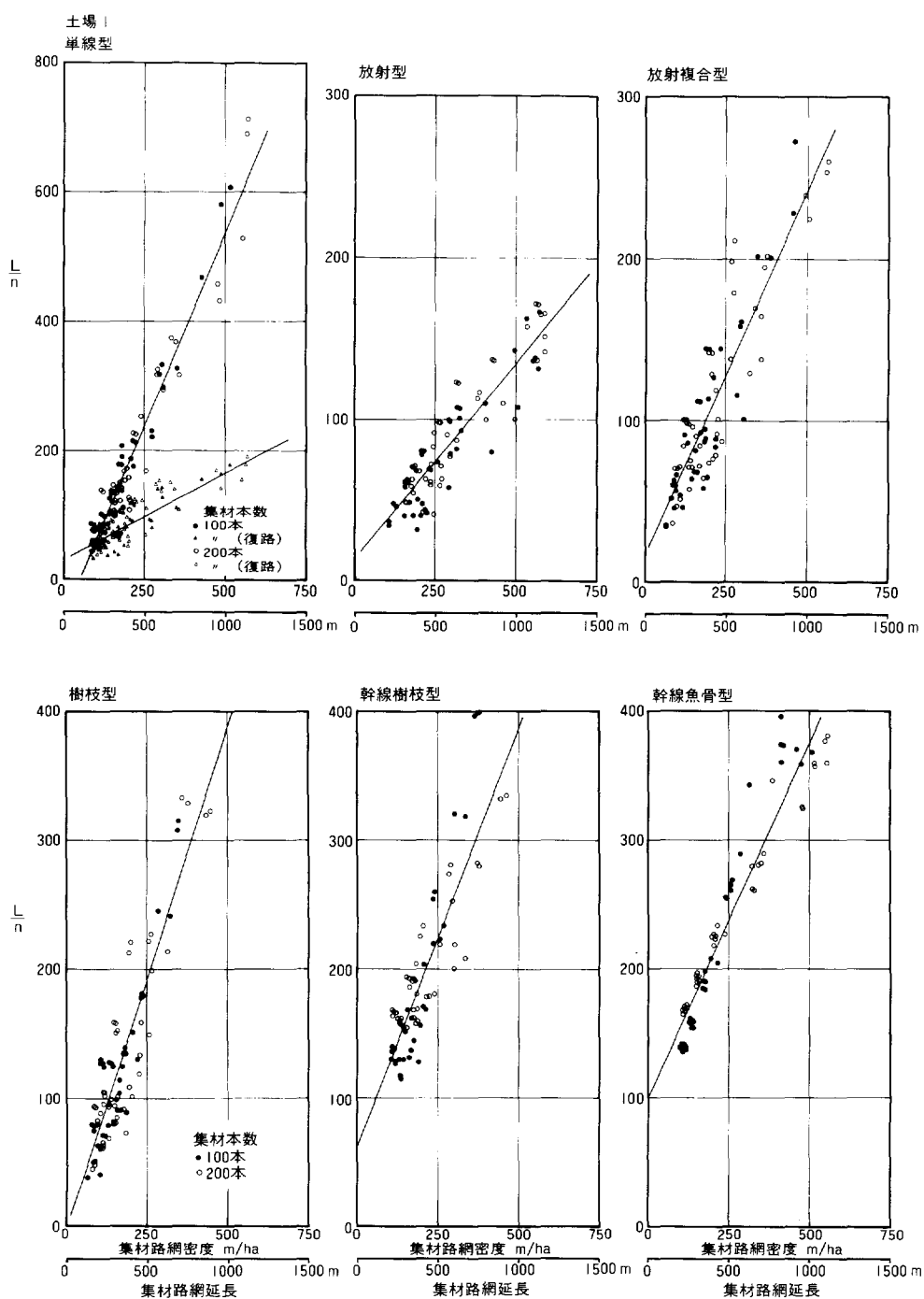


図 58. 集材路網密度とトラクタの往復の平均集材走行距離の関係

表 20. 平均集材走行距離（往復）と集材路網密度に関する関係式の係数

集材路線型		土 場 1		土 場 2		土 場 3	
		$\bar{k}_3$	$\bar{k}_4$	$\bar{k}_3$	$\bar{k}_4$	$\bar{k}_3$	$\bar{k}_4$
放 射 型 路 網		0.2454	13.0730	0.2148	9.8987	0.2061	8.9370
単線型路網	併用集材走行方式	1.1948	-59.4048	0.6239	-16.9588	0.5211	-14.3196
	フリー集材走行方式	0.2804	31.3464	0.2278	17.1040	0.2253	14.7868
放射複合型路網		0.4506	16.8895	0.3790	5.6336	0.3597	2.8805
樹 枝 型 路 網		0.7835	-2.9096	0.5331	-0.0912	0.5117	0.6773
幹線樹枝型路網		0.6422	64.6787	0.4472	24.8168	0.4461	18.8858
幹線魚骨型路網		0.5508	100.7490	0.4213	45.6149	0.4122	36.4063

$$D = \frac{(1 + \eta_\lambda) \tau}{k_1} e^{-k_2 R} \quad (3.11)$$

補正值 η_λ について、ここでは地表障害物による路線変更補正係数と呼称したが、各集材路網型について η_λ を示すと表 19 のとおりである。以上のとおり、地表障害物の影響を考慮した場合の集材路網密度と木寄せ幅の関係は、障害物密度ごとの η_λ を与えることにより、所謂迂回率のかたちで補正することによって定式化することができた。

3.5 トラクタ総走行距離と集材路網密度

トラクタ集材作業における集材搬出の時間は、トラクタが集材木を集材するのに要した往復の総走行距離に関係する。換言すれば、トラクタが集材走行する平均集材距離とその集材回数によって決まる。

集材に要するトラクタの総走行距離は、当然集材量や 1 回当たりの積載量によって異なるが、同一集材路網延長でも集材路網型や集材搬出方式の違いによって、その総走行距離は異なることは、第 II 章第 4 節のモデルからも明らかである。

ここでは、1 回当たりの積載量を 4 m^3 とした場合の各集材路網型について総走行距離と集材路網密度の関係について検討した。

図 57 は、集材量 $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ （集材本数 100 本）の場合の総走行距離と集材路網密度の関係を示したものである。ただし、単線型路網の集材搬出方式は併用集材走行タイプの場合である。図から、トラクタ総走行距離は集材路網密度が大きいほど増大し、各集材路網型とも、ほぼ直線の関係で表されることがわかる。総走行距離 L と集材路網密度 D は、次の関係が成り立つ。

$$L = k_3 D + k_4 \quad (3.12)$$

各集材路網型ごとの係数 k_3 , k_4 については、表 17 のとおりである。

表 17 は、集材量 $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ （集材本数 100 本）と $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ （集材本数 200 本）について示したものであるが、総走行距離は集材量が大きいほど大きくなり、集材量 $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ と $100 \text{ m}^3/\text{ha}$

では、各集材路網型とも、ほぼ2倍の差があることがわかる。

そこで、集材量を1回当たりの積載量で割った値、すなわち、集材回数に相当するが、この値を n とし、総走行距離 L を n で割った値 L/n と集材路網密度 D の関係について示すと図58のとおりであり、各集材路網型について、式(3.13)の関係が得られた。

$$\frac{L}{n} = \bar{k}_3 D + \bar{k}_4 \quad (3.13)$$

ただし、 n : 集材回数 ($n = \frac{W}{w_s}$, W : 集材量 (m^3), w_s : 1回当たり積載量 (m^3))。

表20は、各集材路網型について、 $\bar{k}_3$, $\bar{k}_4$ を示したものである。

図および表から、往復の平均集材走行距離に相当する $\frac{L}{n}$ の値は、集材路網延長距離または集材路網密度が大きいほど増大し、その増加傾向は、単線型路網の併用集材走行タイプが最も大きくなり、放射型路網や単線型のフリー集材走行タイプの場合は小さいことがわかる。また、これらの関係は、各土場数について類似した傾向を示すが、土場数が増えるにしたがって、 $\frac{L}{n}$ の増加傾向は小さくなることがわかった。

第IV章 トラクタ集材作業における最適集材路網

第1節 トラクタ集材作業の集材所要人工数の算定

トラクタ集材作業の最適な集材法は、地形条件に対して経済的かつ技術的にも妥当なトラクタ集材路網の配置を見出すことであり、集材に要する所要人工数を最小にする集材路網型や木寄せ距離および土場間隔（土場数）を適用したトラクタ集材作業を最適集材方法と考えた。

トラクタ集材における生産工程は、その集材作業に投入された所要人工数によって決まってくる。

トラクタ集材作業の所要人工数は、要素作業ごとの所要人工数により決まり、各要素作業の所要人工数の合計を最小にすることが生産効率を最大にすることになる。

表21は、トラクタ集材作業に関する主・副作業の各要素作業を示したものであり、それぞれの要素作業の人工数に関係する要因を列記したものである。表からわかるように、主作業人工数は、伐区内の集材木を伐倒し、ウインチによる荷掛け・木寄せを実行し、全幹、全木あるいは普通集材により所定の土場やトラックの入る林道や作業道沿いまで集材搬出するのに要する人工数であり、山元あるいは土場における造材や簡単な巻立てに要する人工数も含まれる。また副作業人工数は、主としてトラクタ集材路の作設や補修にかかる人工数と土場開設やその補修に要する人工数である。集材路の作設人工数は地形条件もさることながらその作設方法の違い（規格・構造）により所要人工数は異なる。ここでは第三章で述べたように規格の異なる3種類のトラクタ集材路を取り上げている。また、土場開設人工数についても、木製や鋼製を使用した土場と簡単な土の土場ではその作設人工数は異なるが、トラクタ集材では、主に土の平土場や簡単な盛土土場がその対象となっている。

いま、集材作業に要する人工数の最小値を算定するに当たって、集材路延長の多少によって直接変動しない伐倒作業人工数 t_1 と土場作業人工数 t_4 を固定人工数とすると、表21から、全体の集

表 21. トラクタ集材作業の要素作業と関係因子

要素作業		関係因子	係数
主 作 業	伐倒作業 t_1	出材量, 伐倒木の分布, 地形・地表条件	$\bar{a}_1$ (人工/ m^3)
	木寄せ・荷掛け作業 t_2	出材量, 木寄せ距離, 地形・地表条件	$\bar{a}_2$ (人工/ $m^3 \cdot m$)
	集材搬出作業 t_3	総走行距離 (出材量, 走行延長, 集材回数), 地形・地表条件	$\bar{a}_3$ (人工/ $m^3 \cdot m$)
	土場作業 t_4	出材量, 土場構造, 設備	$\bar{a}_4$ (人工/ m^3)
副 作 業	集材路作設・補修		
	幹線作業路 t_{5-1}	集材路延長距離, 地形・地表条件	$\bar{b}_1$ (人工/ m)
	作業路 (主線) t_{5-2}	集材路の作設方法 (集材路の規格・構造)	$\bar{b}_2$ (人工/ m)
	作業路 (支線) t_{5-3}		
	土場開設・補修 t_6	土場の規模, 土場の種類, 地形・地表条件	$\bar{c}$ (人工/ m^2)
その他			

材所要人工数 T は, 式 (4.1) で表される。

$$T = \frac{1}{2} \bar{a}_2 w_v N R + \frac{1}{2} \bar{a}_3 w_s \cdot L + (\bar{b}_1 l_1 + \bar{b}_2 l_2) + \bar{c} m S_A + t_1 + t_4 \quad (4.1)$$

$$\left(T = \frac{1}{2} \bar{a}_2 w_v N R + \frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v N \frac{L}{n} + (\bar{b}_1 l_1 + \bar{b}_2 l_2) + \bar{c} m S_A + t_1 + t_4 \right)$$

ただし, R : 木寄せ幅 (m), L : トラクタ総走行距離 (往復) (m), l_1 幹線作業路延長距離 (m), l_2 : 主線または支線の作業路延長距離 (m), N : 集材本数, m : 土場数, S_A : 1 土場当たりの面積 (m^2), w_v : 集材木 1 本当たりの材積 (m^3), w_s : トラクタ 1 回当たりの積載量 (m^3), n : 集材回数 ($\frac{W}{w_s}$ または $\frac{w_v N}{w_s}$), W : 集材量 ($W = w_v N$) (m^3) である。

ここで, 式を簡単にするために 1 伐区当たりの土場面積を一定とすると, $m S_A$ は一定となり, 土場開設人工数 t_6 も一定となる。すなわち, t_1, t_4 および t_6 の合計を T' とおくと, トラクタ総走行距離 L は, 式 (3.12) または (3.13) から集材路網延長または路網密度の関係で表されることから, 式 (3.13) を適用して式 (4.1) に代入すると集材所要人工数 T は次式 (4.2) のとおりになる。

$$\begin{aligned}
T &= \frac{1}{2} \bar{a}_2 w_v N R + \frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v N \{ \bar{k}_3 (D + \bar{D}) + \bar{k}_4 \} + \bar{b}_1 l_1 + \bar{b}_2 l_2 + T' \\
T &= \frac{1}{2} \bar{a}_2 w_v N R + \left(\frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v N \bar{k}_3 / S + \bar{b}_1 \right) l_1 \\
&\quad + \left(\frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v N \bar{k}_3 / S + \bar{b}_2 \right) l_2 + \frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v N \bar{k}_4 + T' \quad (4.2)
\end{aligned}$$

ただし, S : 対象伐区面積 (ha), $\bar{k}_3, \bar{k}_4$: 係数。

そこで, 幹線作業路および主・支線の作業路の迂回率を考慮して, それぞれ η_1 , および η_2 を与え, ha 当たりの集材所要人工数を T_L で表すと,

$$T_L = \frac{1}{2} \bar{a}_2 \bar{W} R + \left(\frac{1}{2} \bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_3 + \bar{b}_1 \right) \bar{D} (1 + \eta_1) \\ + \left(\frac{1}{2} \bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_3 + \bar{b}_2 \right) \bar{D} (1 + \eta_2) + \frac{1}{2} \bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_4 + \frac{T'}{S} \quad (4.3)$$

となる。それぞれ係数を式 (4.4) で表わすと、 T_L は、木寄せ幅 R と幹線作業路密度 $\bar{D}$ および、主・支線作業路密度 D の関数で示される。

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{2} \bar{a}_2 w_v \bar{N} = \frac{1}{2} \bar{a}_2 \bar{W} \\ B_1 &= \frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v \bar{N} \bar{k}_3 + \bar{b}_1 = \frac{1}{2} \bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_3 + \bar{b}_1 \\ B_2 &= \frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v \bar{N} \bar{k}_3 + \bar{b}_2 = \frac{1}{2} \bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_3 + \bar{b}_2 \\ T_s &= \frac{1}{2} \bar{a}_3 w_v \bar{N} \bar{k}_4 + \frac{T'}{S} = \frac{1}{2} \bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_4 + \frac{T'}{S} \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

$$T_L = AR + B_1 \bar{D} (1 + \eta_1) + B_2 \bar{D} (1 + \eta_2) + T_s \quad (4.5)$$

ただし、 $\bar{N}$: ha 当たりの集材本数 (本/ha)、 $\bar{W}$: ha 当たりの集材材積 (m^3/ha)。

式 (4.5) は、幹線作業路を設ける場合の一般式である。木寄せ幅、作業路密度および幹線作業路密度が独立変数として変わる場合については後節で詳述する。ここでは幹線作業路延長は一定とし、幹線作業路の有無に関係なく、全集材路網密度を $\hat{D}$ とし、その迂回率とその係数を η および B とすると、ha 当たりの集材所要人工数 T_L は式 (4.6) となり、 $\tau=1$ の場合の式 (3.11) の関係を代入すると、式 (4.7) のとおり、木寄せ幅 R の関数となる。

$$T_L = AR + B \hat{D} (1 + \eta) + T_s \quad (4.6)$$

$$T_L = AR + \frac{B(1 + \eta_\lambda)(1 + \eta)}{k_1} e^{-k_2 R} + T_s \quad (4.7)$$

すなわち、ha 当たりの集材所要人工数 T_L は、木寄せ幅 R を横軸にとると、 R の増大にともなう増加関数と集材路密度の減少にともなう減少関数の合成関数で表されることになる。 T_L を最小にするためには、

$$dT_L/dR = 0 \text{ より} \\ A - \frac{B(1 + \eta_\lambda)(1 + \eta)k_2}{k_1} e^{-k_2 R} = 0 \\ \therefore R = \frac{1}{k_2} \ln \frac{Ak_1}{Bk_2(1 + \eta_\lambda)(1 + \eta)} \quad (4.8)$$

となり、最小集材所要人工数を与える木寄せ幅 R が求められる。

しかし、第Ⅲ章第3節で論じたとおり、地形傾斜が平坦でない場合では、地形傾斜が急になるにしたがって集材路の導入は困難となり、集材率を確保するためには、木寄せ幅に条件が加えられることになり、式 (4.8) の木寄せ幅が、その条件を満たすか否かの検討が必要となる。

要するに、集材率を確保し、しかも最小集材所要人工数を与える木寄せ幅は、地形傾斜ごとに異なり、さらに集材路網型ごとに異なることから、地形傾斜ごとの集材所要人工数を最小にする集材路網型および木寄せ幅が算定されることになる。また、土場間隔または土場数については、伐区当

たりの土場面積（ mS_A ）を一定とした場合、土場開設人工数は同じとなるが、土場を分散させることによって、同一の木寄せ幅に対し、集材路網密度は小さくなり、集材率は高くなる。しかし、土場を分散させるほど、土場間の連結路が必要となる。したがって、地形傾斜ごとに適正な土場間隔が算定されることになる。

なお、適正な土場数または1土場当たりの適正伐区面積については、土場開設人工数（ t_6 ）とその他の要素作業の所要人工数（ $t_1 \sim t_5$ ）から、次式（4.9）のとおり算定することができる。

$$T_L = \bar{a} \bar{W} K x (1 + \eta) + \frac{10^4 \bar{c} S_A}{k x^2}$$

$$dT_L/dx = 0 \quad \text{より}$$

$$x = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^4 \bar{c} S_A}{k K \bar{a} \bar{W} (1 + \eta)}} \quad (4.9)$$

ただし、 $\bar{W}$: ha 当たりの集材材積（ m^3/ha ）、 $\bar{a}$: 単位材積当たり、単位距離当たりの集材所要人工数（人工数/ $m \cdot m^3$ ）、 $\bar{c}$: m^2 当たりの土場作設人工数（人工数/ m^2 ）、 S_A : 1 土場当たりの土場面積（ m^2 ）、 k : 伐区形状指数（ $k = \frac{y}{x}$, $0 < k \leq 1$ ）、 x, y : 矩形伐区の長辺と短辺、 $K = E(l)/x$ 、 $E(l)$ は第Ⅱ章第2節で示した平均距離（表2および図7）、 η : 集材路の迂回率。

表22. 国有林を対象としたトラクタ集材作業の要素作業別人工数

要素作業		天然林			人工林
		択伐	皆伐	皆・択伐	
主 作 業	伐倒作業（人工数/ m^3 ） $\bar{a}_1$	0.0624	0.0647	0.0523	0.1358
	木寄せ・荷掛け作業				
	人工数（人工数/ $m^3 \cdot m$ ） $\bar{a}_2$	0.1817 E-2	0.2787 E-2	0.1648 E-2	0.2014 E-2
	集材木1本当たり材積（ m^3 ） w_V	1.62	0.83	1.18	0.39
	人工数（人工数/本・ m ） a_N	0.2944 E-2	0.2313 E-2	0.1945 E-2	0.0785 E-2
	集材搬出作業				
	人工数（人工数/ $m^3 \cdot m$ ） $\bar{a}_3$	0.1749 E-3	0.2366 E-3	0.2025 E-3	0.3342 E-3
	1回当たり積載量（ m^3 ） w_S	3.93	2.60	3.44	1.96
	人工数（人工数/総走行距離） a_L	0.6874 E-3	0.6153 E-3	0.6966 E-3	0.6550 E-3
	土場作業 造材（人工数/ m^3 ） $\bar{a}_{4-1}$	0.0281	0.0623	0.0362	0.0741
	巻立て（人工数/ m^3 ） $\bar{a}_{4-2}$	0.0537	0.0729	0.0512	0.0834
副 作 業	集材路作設・補修（人工数/ m ）				
	幹線作業路 $\bar{b}_1$	0.02453（40.8 m/日） 地山の切取り、湿地の土工			
	作業路（主線） $\bar{b}_2$	0.01635（61.1 m/日） ブル排土板による地表の整地			
	作業路（主線） $\bar{b}_2$	0.00614（162.9 m/日） 地表障害物の除去、整理			
	土場開設・補修（人工数/ m^2 ） $\bar{c}$	（土盤台の土場）（木製盤台の土場）			
	規模 400 m^2	0.0338	0.1764		
	600 m^2	0.0261	0.1686		

第 2 節 トラクタ集材所要人工数と集材路網型

2.1 集材所要人工数を最小にする集材路網型と木寄せ幅

前章までに論じてきた諸評価や諸関係を使って、トラクタ集材所要人工数を最小にする集材路網型および木寄せ幅について算定した。

表 22 は、第 II 章第 5 節で述べた国有林営林署を対象に収集したトラクタ集材に関する事例分析の結果である。これらの評価値を基に本試験に適用した結果が図 59 のとおりである。図は、択伐地（集材量 $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ ）および皆伐地（集材量 $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ ）について示したものである。図中の各数字は、①：木寄せ、荷掛け作業人工数、②：集材搬出作業人工数、③：集材路作設・補修人工数であり、④：①②③の合計人工数である。図から、伐倒作業人工数 t_1 、土場作業人工数 t_4 および土場開設・補修人工数 t_6 を一定（除いた）とした集材所要人工数（以降単に所要人工数と呼ぶことにする。）は、横軸に木寄せ幅 R をとると、ある木寄せ幅で最小値を有している。

また所要人工数を最小にする集材路網型は樹枝型路網となり、幹線作業路を配設した幹線樹枝型や幹線魚骨型路網は、ほかの路網型に比べて所要人工数は大きいこと。最小所要人工数を与える木寄せ幅は、択伐地、皆伐地とも樹枝型路網が最も小さくなるが、各集材路網型とも土場数 1 の場合、択伐地では $30 \sim 40 \text{ m}$ 、皆伐地では $20 \sim 40 \text{ m}$ の範囲にあること。最小所要人工数は、択伐地に比べ、皆伐地の方が大きいこと、などが図からわかる。表 23 は各土場数について最小所要人工数お

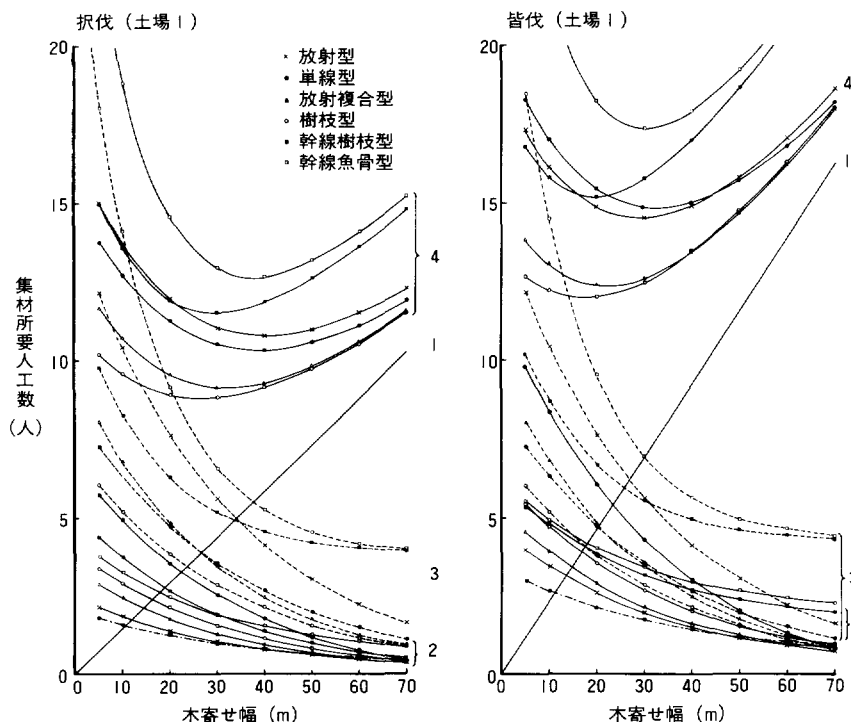


図 59. トラクタ集材路網型別、最小集材所要人工数を与える木寄せ幅 ($\theta=0^\circ$)

よび最小所要人工数を与える木寄せ幅と集材路網密度について算定したものである。表から各集材路網型とも土場が分散するにしたがって、最小所要人工数は小さくなり、最小所要人工数を与える木寄せ幅も小さくなることがわかる。

表 24 は式 (4.9) から表 22 の施業ごとの 1 土場当たりの適正伐区面積を算定したものである。ただし、 $S_A = 600 \text{ m}^2$, $\eta = 0$ の場合である。ここでは土場が伐区周囲上の任意点にある場合（式 (2.8)）と伐区内の任意点にある場合（式 (2.10)）について取り上げているが、表から 1 土場当たりの適正伐区面積は伐区形状指数 k が 1 のとき最大となり、土場が伐区の周囲上にある場合について 1 土場当たりの適正伐区面積をみると、択伐地で 5.4 ha、皆伐地で 2.1 ha、皆択伐地で 4.0 ha となり、人工林地で 1.2 ha となることがわかる。表 24 は、集材路導入計画の際の土場数の選定に対して一つの目安を与えることになる。

また図 60 は、土場数 1 の場合の ha 当たりの集材材積 $\bar{W}$ を変えた場合の最小所要人工数を与

表 23. 集材所要人工数を最小にする木寄せ幅とトラクタ集材路網密度 ($\theta = 0^\circ$)

トラクタ集材路網型		択 伐			皆 伐		
		R	D	T_L	R	D	T_L
土 場 1		m	m / ha	人工数 / ha	m	m / ha	人工数 / ha
	放 射 型 路 網	40.2	332.7	5.397	29.3	465.9	7.249
	単 線 型 路 網	38.8	214.7	5.044	33.2	254.0	7.234
	放射複合型路網	31.9	264.1	4.574	22.3	365.4	6.174
	樹 枝 型 路 網	26.7	256.2	4.402	17.6	336.3	5.814
	幹線樹枝型路網	29.2	118.9 (196.6)	5.625	22.1	179.8 (265.4)	7.495
	幹線魚骨型路網	37.6	68.8 (146.5)	6.260	32.6	95.4 (181.0)	8.622
土 場 2		m	m / ha	人工数 / ha	m	m / ha	人工数 / ha
	放 射 型 路 網	34.5	260.4	4.453	24.8	380.9	5.912
	単 線 型 路 網	33.9	201.6	4.222	27.5	261.8	5.877
	放射複合型路網	30.5	220.3	4.031	20.3	332.9	5.302
	樹 枝 型 路 網	27.9	216.7	3.944	17.9	315.9	5.186
	幹線樹枝型路網	26.5	146.6 (201.6)	4.714	21.1	201.2 (256.2)	6.066
	幹線魚骨型路網	37.0	78.9 (133.9)	5.465	31.6	111.1 (166.1)	7.249
土 場 3		m	m / ha	人工数 / ha	m	m / ha	人工数 / ha
	放 射 型 路 網	30.8	292.8	4.367	20.5	422.4	5.695
	単 線 型 路 網	29.8	235.1	4.107	23.3	300.2	5.627
	放射複合型路網	26.5	253.8	3.950	16.7	362.9	5.137
	樹 枝 型 路 網	23.4	249.8	3.864	14.2	339.7	5.034
	幹線樹枝型路網	26.3	112.1 (182.6)	4.856	20.4	170.7 (248.3)	6.183
	幹線魚骨型路網	34.6	67.0 (137.5)	5.534	29.2	98.9 (176.5)	7.251

注) () は幹線作業路を含む。

表 24. 伐区形状と適正伐区面積

伐区形状指数 (矩形の短辺・ 長辺の比) k		天 然 林						人 工 林	
		択 伐		皆 伐		皆・択 伐			
		x (m)	$\bar{S}$ (ha)	x (m)	$\bar{S}$ (ha)	x (m)	$\bar{S}$ (ha)	x (m)	$\bar{S}$ (ha)
対象伐区周辺の任意 点に土場がある場合	0.1	612.9	3.757	377.9	1.428	526.6	2.775	290.1	0.843
	0.2	472.3	4.463	291.2	1.698	405.9	3.296	223.6	0.999
	0.3	403.2	4.879	248.6	1.855	346.4	3.599	190.8	1.091
	0.4	357.2	5.104	220.2	1.940	306.9	3.769	169.1	1.143
	0.5	323.8	5.242	199.7	1.993	278.2	3.870	153.3	1.174
	0.6	298.1	5.330	183.8	2.027	256.1	3.936	141.1	1.194
	0.7	277.3	5.382	171.0	2.047	238.3	3.975	131.3	1.207
	0.8	260.2	5.417	160.4	2.060	223.6	4.000	123.2	1.214
	0.9	245.7	5.432	151.5	2.065	211.1	4.011	116.3	1.218
	1.0	233.2	5.438	143.8	2.068	200.4	4.016	110.4	1.219
対象伐区内の任意 点に土場がある場合	0.1	625.0	3.906	385.4	1.484	537.1	2.884	295.8	0.876
	0.2	490.7	4.814	302.5	1.830	421.6	3.554	232.2	1.077
	0.3	422.6	5.359	260.6	2.038	363.2	3.959	200.0	1.200
	0.4	378.0	5.715	233.1	2.172	324.8	4.219	178.9	1.281
	0.5	345.0	5.951	212.7	2.263	296.5	4.394	163.3	1.333
	0.6	319.1	6.111	196.7	2.323	274.2	4.511	151.0	1.368
	0.7	297.8	6.209	183.6	2.361	255.9	4.583	141.0	1.392
	0.8	279.9	6.270	172.6	2.384	240.5	4.627	132.5	1.405
	0.9	264.5	6.295	163.1	2.394	227.2	4.646	125.2	1.411
	1.0	251.2	6.310	154.9	2.399	215.8	4.657	118.9	1.414

注) x : 矩形の長辺, $\bar{S}$: 適正伐区面積

える木寄せ幅について示したものである。

以上述べた関係は、集材路の林内への導入が容易な平坦地形すなわち $\theta=0^\circ$ の場合のものである。しかし、前述のとおり平坦地以外では、地形傾斜が急になると集材路の導入は困難となり、集材を実行可能にし、一定の集材率を確保するためには、木寄せ幅をある長さ以上にしなければならない。そこで、ここではひとまず、集材率 90% を確保する条件に対して地形傾斜ごとの所要人工数を最小にする集材路網型と木寄せ幅について検討を行った。

図 61 は、図 59 の場合について地形傾斜 10° , 15° , および 20° の場合の最小所要人工数を与える木寄せ幅および最小値を示したものである。図中の記号（白丸印）は表 18 の集材率 90% を確保するための最小木寄せ幅の位置を示したものであり、90% 以上の集材率を確保するためには、ここで示した記号より大きい木寄せ幅（実線部分）が必要となる。また図中の一点破線は、放射型および単線路網のフリー集材走行タイプの場合である。図から、幹線魚骨型を除く各集材路網型は、地形傾斜が急になるにしたがって、条件を満たす実線部分は右に移行し、最小所要人工数を与える木寄せ幅およびその最小値は大きくなることがわかる。そこでこれらの関係から地形傾斜に対し集材率 90% を確保するための最小木寄せ幅（図中の曲線 I）と条件が加えられない平坦地の場合（図

59) の最適木寄せ幅（図中の直線Ⅱ）の関係を示すと、図 62 のとおりである。図から、集材率 90% 以上を確保するためには、図中の曲線Ⅰより大きい木寄せ幅が必要となり、地形傾斜が急になるほど、その木寄せ幅は大きくする必要がある。一方、最適木寄せ幅（図中の直線Ⅱ）は地形傾斜が小さいときは、集材率 90% の条件を満足しているが地形傾斜が大きくなると破線で示すように曲線Ⅰより下方となり、その条件を満たさなくなる。つまり、両者の交点に対し、交点以下の地形傾斜では、最適木寄せ幅が適用できるが、交点以上の破線部の地形傾斜では、曲線Ⅱで与える木寄せ幅が最小所要人工数を与えることになる。ただし、幹線魚骨型路網では前述のとおり各地形傾斜に対して 90% 以上の集材率が確保されるのでそれぞれの地形傾斜に対して図 59 に示した最適木寄せ幅が適用されることになる。これらの関係から、各集材路網型について地形傾斜ごとの最

小所要人工数を求めると図 63 のとおりである。図は縦軸に最小所要人工数、横軸に地形傾斜と第 1 報で示した傾斜区分をとったものであるが、地形が平坦～緩斜地では、放射型や単線型のフリー集材走行タイプの集材が最小所要人工数を与えること。また、地形が中斜地になると樹枝型や放射複合型が最小所要人工数を与えること。さらに急斜～急峻地では、幹線作業路を配設した幹線型の路網が最小所要人工数を与えることなどがわかる。

要するに、所要人工数を最小にする集材路網型および木寄せ幅が、地形傾斜ごとに与えられることになる。

2.2 トラクタ地形区分と最適集材法

表 25 は、地形傾斜ごとの各集材路網型の最小所要人工数とそのときの木寄せ幅を示したものである。表中記載の枠印は、それぞれの地形傾斜に対して最小所要人工数を与える集材路網型について、小さい順に二つの路網型を取り上げたものである。表から、幹線魚骨型を除く各集材路網型は、地形傾斜が急になるほど、最小所要人工数およびそのときの木寄せ幅は大きくなる。また、各地形傾斜に対する最適な路網型は、地形が平坦～緩斜地では、放射型と単線型のフリー集材走行タイプ、地形傾斜が 20～33% の中斜地では樹枝型や併用集材走行タイプの放射複合型となる。また、地形傾斜が 33～50% の急斜地では幹線樹枝型が最適な路網型となり、50% 以上の急峻地形では幹線魚骨型が最適な路網型となることなどがわかる。これらの結果は、択伐地および皆伐地ともほぼ同様の傾向を示し、また、土場数 1～3 の場合についても、類似した傾向を示した。

表 26 は、表 25 より地形傾斜区分ごとの最適集材路網型について土場数別の最小所要人工数を示

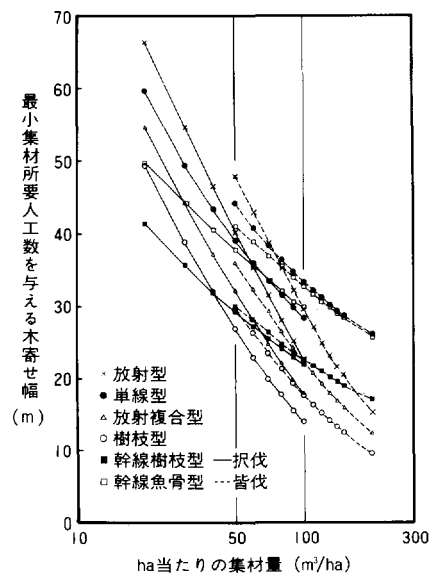


図 60. 皆伐・択伐別の ha 当たりの集材量と最小集材所要人工数を与える木寄せ幅

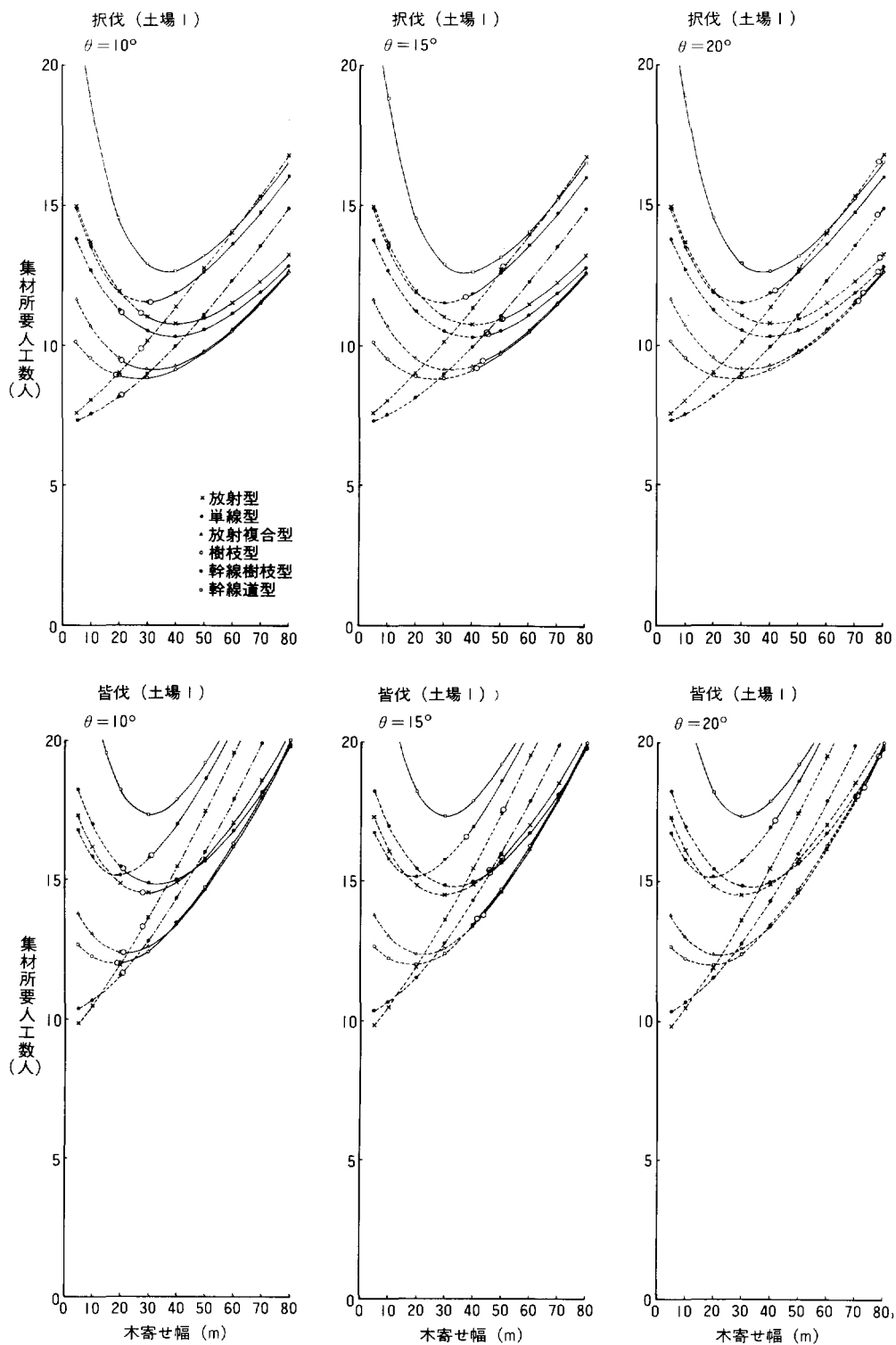


図 61. 地形傾斜ごとの最小集材所要人工数を与える木寄せ幅 ($\theta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ の場合)

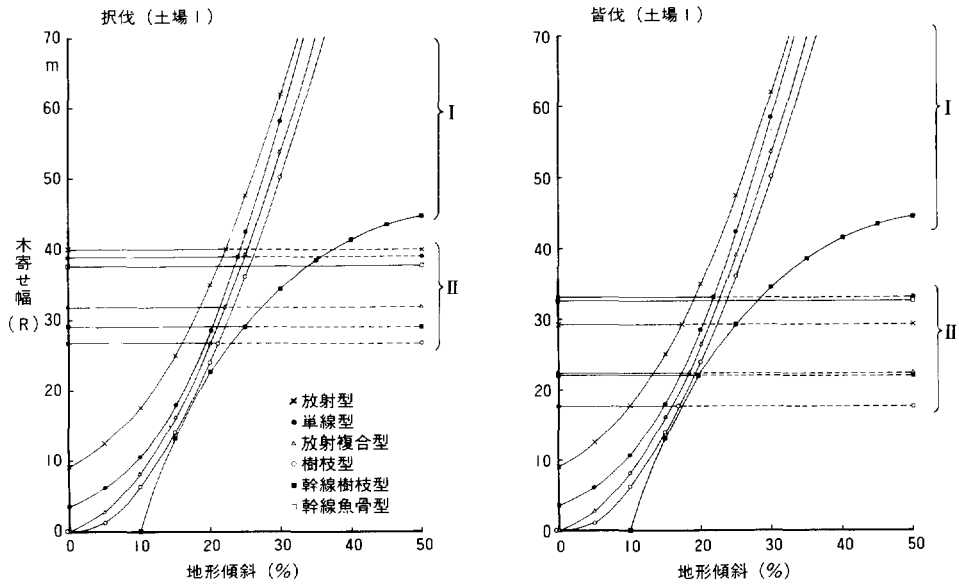


図 62. 集材率 90% を確保する場合の最小集材所要人工数を与える木寄せ幅

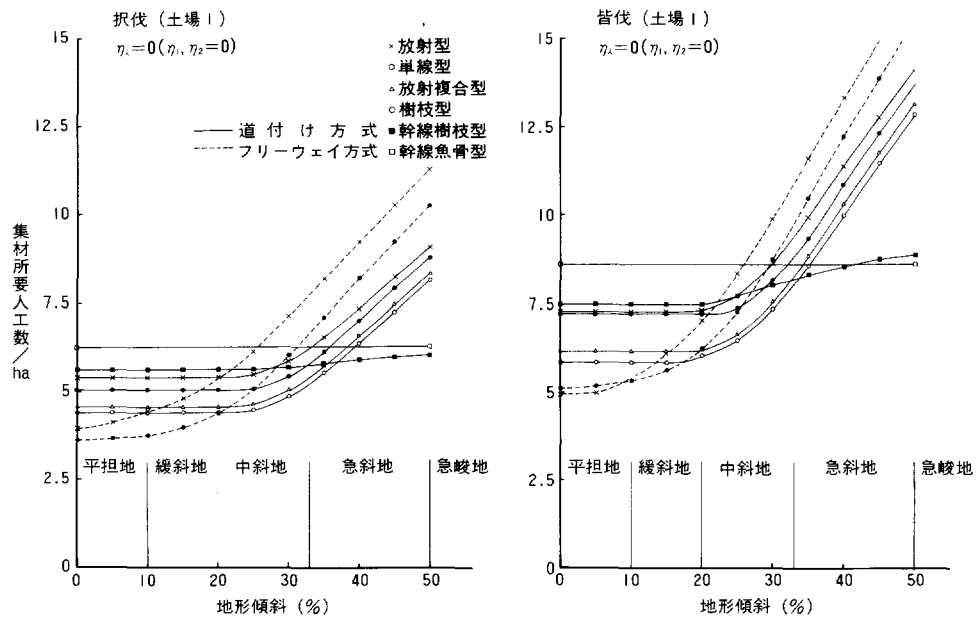


図 63. トラクタ地形傾斜区分と最小集材所要人工数を与える集材路網パターン

表25. 地形傾斜ごとの最小集材所要人工数と最小集材所要人工数を与える集材路網型および木寄せ幅（集材率90%以上確保する場合）

	土場 数	地形傾斜 %	放 射 型				単 線 型				放射複合型		樹 枝 型		幹線樹枝型		幹線魚骨型	
			R	T _L	R*	T _L *	R	T _L	R*	T _L *	R	T _L	R	T _L	R	T _L	R	T _L
択	1	5	40.2	5.397	12.6	4.138	38.8	5.044	6.1	3.673	31.9	4.574	26.7	4.402	29.2	5.625	37.6	6.260
		10	40.2	5.397	17.8	4.403	38.8	5.044	10.7	3.768	31.9	4.574	26.7	4.402	29.2	5.625	37.6	6.260
		15	40.2	5.397	25.2	4.809	38.8	5.044	18.0	3.981	31.9	4.574	26.7	4.402	29.2	5.625	37.6	6.260
		20	40.2	5.397	35.1	5.395	38.8	5.044	28.6	4.403	31.9	4.574	26.7	4.402	29.2	5.625	37.6	6.260
		26.5	51.7	5.531	51.7	6.457	47.1	5.114	47.1	5.352	43.5	4.721	40.1	4.574	31.0	5.636	37.6	6.260
		33	71.3	6.215	71.3	7.792	68.8	5.795	68.8	6.684	62.6	5.426	59.2	5.261	37.0	5.736	37.6	6.260
		41.5	97.4	7.631	97.4	9.641	97.2	7.313	97.2	8.609	88.2	6.862	84.9	6.653	42.2	5.938	37.6	6.260
		50	119.9	9.044	119.3	11.225	120.0	8.780	120.0	10.226	110.6	8.338	108.1	8.144	44.8	6.050	37.6	6.260
	2	5	34.5	4.453	12.6	3.683	33.9	4.222	6.1	3.226	30.5	4.031	27.9	3.944	26.5	4.714	37.0	5.465
		10	34.5	4.453	17.8	3.945	33.9	4.222	10.7	3.358	30.5	4.031	27.9	3.944	26.5	4.714	37.0	5.465
		15	34.5	4.453	25.2	4.354	33.9	4.222	18.0	3.637	30.5	4.031	27.9	3.944	26.5	4.714	37.0	5.465
		20	34.5	4.454	35.1	4.954	33.9	4.222	28.6	4.156	30.5	4.031	27.9	3.944	26.5	4.714	37.0	5.465
		26.5	51.7	4.799	51.7	6.045	47.1	4.442	47.1	5.261	43.5	4.243	40.1	4.123	31.0	4.760	37.0	5.465
		33	71.3	5.728	71.3	7.412	68.8	5.420	68.8	6.725	62.6	5.070	59.2	4.897	37.0	4.921	37.0	5.465
		41.5	97.4	7.365	97.4	9.290	97.2	7.212	97.2	8.751	88.2	6.634	84.9	6.417	42.2	5.130	37.0	5.465
		50	119.3	8.885	119.3	10.889	120.0	8.808	120.0	10.411	110.6	8.178	108.1	7.992	44.8	5.252	37.0	5.465
伐	3	5	30.8	4.367	12.6	3.270	29.8	4.107	6.1	2.864	26.5	3.950	23.4	3.864	26.3	4.856	34.6	5.534
		10	30.8	4.367	17.8	3.565	29.8	4.107	10.7	3.054	26.5	3.950	23.4	3.864	26.3	4.856	34.6	5.534
		15	30.8	4.367	25.2	4.011	29.8	4.107	18.0	3.402	26.5	3.950	23.4	3.864	26.3	4.856	34.6	5.534
		20	35.1	4.390	35.1	4.642	29.8	4.107	28.6	3.985	26.5	3.950	23.4	3.864	26.3	4.856	34.6	5.534
		26.5	51.7	4.820	51.7	5.760	47.1	4.443	47.1	5.145	43.5	4.269	40.1	4.150	31.0	4.917	34.6	5.534
		33	71.3	5.769	71.3	7.138	68.8	5.471	68.8	6.631	62.6	5.131	59.2	4.961	37.0	5.109	34.6	5.534
		41.5	97.4	7.394	97.4	9.021	97.2	7.265	97.2	8.663	88.2	6.688	84.9	6.467	42.2	5.347	34.6	5.534
		50	119.3	8.902	119.3	10.619	120.0	8.853	120.0	10.323	110.6	8.218	108.1	8.023	44.8	5.484	34.6	5.534

	土場 数	土地傾斜 %	放 射 型				単 線 型				放射複合型		樹 枝 型		幹線樹枝型		幹線魚骨型	
			R	T _L	R*	T _L *	R	T _L	R*	T _L *	R	T _L	R	T _L	R	T _L	R	T _L
皆	1	5	29.3	7.249	12.6	4.974	33.2	7.234	6.1	5.190	22.3	6.174	17.6	5.814	22.1	7.495	32.6	8.622
		10	29.3	7.249	17.8	5.425	33.2	7.234	10.7	5.314	22.3	6.174	17.6	5.814	22.1	7.495	32.6	8.622
		15	29.3	7.249	25.2	6.101	33.2	7.234	18.0	5.616	22.3	6.174	17.6	5.814	22.1	7.495	32.6	8.622
		20	35.1	7.305	35.1	7.064	33.2	7.234	28.6	6.239	26.6	6.209	23.8	6.064	22.6	7.503	32.6	8.622
		26.5	51.7	7.969	51.7	8.778	47.1	7.529	47.1	7.692	43.5	6.874	40.1	6.708	31.0	7.816	32.6	8.622
		33	71.3	9.383	71.3	10.903	68.8	8.825	68.8	9.759	62.6	8.287	59.2	8.057	37.0	8.203	32.6	8.622
		41.5	97.4	11.836	97.4	13.823	97.2	11.350	97.2	12.766	88.2	10.740	84.9	10.431	42.2	8.613	32.6	8.622
		50	119.3	14.030	119.3	16.313	120.0	13.708	120.0	15.302	110.6	13.134	108.1	12.855	44.8	8.838	32.6	8.622
	2	5	24.8	5.912	12.6	4.565	27.5	5.877	6.1	4.189	20.3	5.302	17.9	5.186	21.1	6.066	31.6	7.249
		10	24.8	5.912	17.8	4.997	27.5	5.877	10.7	4.383	20.3	5.302	17.9	5.186	21.1	6.066	31.6	7.249
		15	24.8	5.912	25.2	5.659	27.5	5.877	18.0	4.805	20.3	5.302	17.9	5.186	21.1	6.066	31.6	7.249
		20	35.1	6.122	35.1	6.619	28.6	5.879	28.6	5.604	26.6	5.388	23.8	5.257	22.6	6.082	31.6	7.249
		26.5	51.7	7.098	51.7	8.351	47.1	6.583	47.1	7.325	43.5	6.246	40.1	6.015	31.0	6.386	31.6	7.249
		33	71.3	8.813	71.3	10.505	68.8	8.343	68.8	9.616	62.6	7.853	59.2	7.543	37.0	6.767	31.6	7.249
		41.5	97.4	11.526	97.4	13.457	97.2	11.267	97.2	12.796	88.2	10.482	84.9	10.114	42.2	7.175	31.6	7.249
		50	119.3	13.960	119.3	15.965	120.0	13.804	120.0	15.404	110.6	12.963	108.1	12.654	44.8	7.399	31.6	7.249
伐	3	5	20.5	5.695	12.6	4.139	23.3	5.627	6.1	3.812	16.7	5.137	14.2	5.034	20.4	6.183	29.2	7.251
		10	20.5	5.695	17.8	4.611	23.3	5.627	10.7	4.084	16.7	5.137	14.2	5.034	20.4	6.183	29.2	7.251
		15	20.5	5.695	25.2	5.316	23.3	5.627	18.0	4.598	16.7	5.137	14.2	5.034	20.4	6.183	29.2	7.251
		20	35.1	6.067	35.1	6.311	28.6	5.684	28.6	5.480	26.6	5.321	23.8	5.196	22.6	6.213	29.2	7.251
		26.5	51.7	7.124	51.7	8.070	47.1	6.561	47.1	7.267	43.5	6.260	40.1	6.027	31.0	6.591	29.2	7.251
		33	71.3	8.854	71.3	10.233	68.8	8.370	68.8	9.582	62.6	7.870	59.2	7.550	37.0	7.033	29.2	7.251
		41.5	97.4	11.550	97.4	13.184	97.2	11.290	97.2	12.765	88.2	10.471	84.9	10.078	42.2	7.488	29.2	7.251
		50	119.3	13.969	119.3	15.690	120.0	13.817	120.0	15.371	110.6	12.932	108.1	12.586	44.8	7.733	29.2	7.251

注) *:フリーウェイ方式, T_L: ha 当たり人工数

表 26. 上場間の連結路の併設を考慮した場合の地形傾斜ごとおよび土場数ごとの最小集材所要人工数とその木寄せ幅

地形傾斜 %	最適集材路網型	択 伐						皆 伐					
		土場 1		土場 2		土場 3		土場 1		土場 2		土場 3	
		R	T _L	R	T _L	R	T _L	R	T _L	R	T _L	R	T _L
～ 10	単線型(フリーウェイ方式)	6.1	3.672	6.1	3.533	6.1	3.274	6.1	5.190	6.1	4.496	6.1	4.221
	放射型(フリーウェイ方式)	12.6	4.138	12.6	3.990	12.6	3.679	12.6	4.974	12.6	4.872	12.6	4.548
10 ～ 20	単線型(フリーウェイ方式)	14.4	3.875	14.4	3.804	14.4	3.619	14.4	5.465	14.4	4.901	14.4	4.751
	樹枝型	26.7	4.402	27.9	4.251	23.4	4.274	17.6	5.814	17.9	5.493	14.2	5.444
20 ～ 33	樹枝型	33.4	4.488	34.0	4.341	31.8	4.417	32.0	6.386	32.0	5.943	32.0	6.021
	放射複合型	37.7	4.647	37.0	4.444	35.0	4.519	35.1	6.542	35.1	6.124	35.1	6.200
33 ～ 50	幹線樹枝型	39.6	5.847	39.6	6.252	39.6	6.864	39.6	8.408	39.6	8.198	39.6	8.896
	幹線魚骨型	37.6	6.260	37.0	6.691	34.6	7.170	32.6	8.622	31.6	8.476	29.2	8.886
50 ～	幹線樹枝型	44.8	6.050	44.8	6.479	44.8	7.120	44.8	8.838	44.8	8.626	44.8	9.369
	幹線魚骨型	37.6	6.260	37.0	6.691	34.6	7.170	32.6	8.622	31.6	8.476	29.2	8.886

注) T_L はha当たりの人工数

したものである。ここでは、土場数の違いとして土場間の連結路の併設を考慮したものであり、連結路作設人工数が加えられた所要人工数である。ただし、伐区当たりの土場面積は土場数に関係なく一定としている。表から、地形傾斜区分ごとの最適集材路網型に対する所要人工数は、地形傾斜が平坦になるほど、土場数を多く分散した方が小さくなり、択伐地では、平坦地で3土場、中斜地では2土場、急斜～急峻地では1土場の場合が最小所要人工数となる。皆伐地では、平坦～緩斜地では3土場、中斜～急峻地では2土場が最小所要人工数を与えた。また、地形傾斜区分ごとの最適路網型として選択された2路網の平均の木寄せ幅を示すと表27のとおりである。表からそれぞれの最適路網型の平均の木寄せ幅は、地形傾斜が急になるにしたがって、大きくなり、土場数が増えるにしたがって、小さくなる。また、皆伐地は択伐地に比べその木寄せ幅は小さくなることがわかる。

これまで論じられた結果を取りまとめると表28のとおりである。

表は、トラクタ地形傾斜区分に対し最適集材法を与えるものであり、各地形傾斜区分について最適な集材路網型、平均木寄せ距離、および土場数を示している。表から、結果を概要すると次のとおりである。

- ① 全般の集材路網についてみると、地形傾斜が急になるにしたがって集材路網密度は疎になり、集材路網の配置は、偏りが大きい集塊パターンとなる。すなわち、平坦地では路網配置指標（f 値）はほぼ1（均一パターン）になり、中斜地では $1.33 \sim \frac{\pi}{2}$ （ランダムパターン）となり、さらに急斜～急峻地では $\frac{\pi}{2} \sim 2$ （集塊パターン）となる。
- ② 地形傾斜ごとの最適集材路網型は、地形が平坦地では、単線型や放射型のフリー集材走行タイプ。中斜地では、樹枝型や併用集材走行タイプの放射複合型路網。さらに急斜～急峻地で

表27. 地形傾斜区分ごとの最小集材所要人工数を与える集材路網型と木寄せ幅の平均

地形傾斜 %	最適集材路網型	択 伐				皆 伐				平 均
		土場1	土場2	土場3	平 均	土場1	土場2	土場3	平 均	
～10	単 線 型 (フリーウェイ方式) 放 射 型 (フリーウェイ方式)	m 9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
10～20	単 線 型 (フリーウェイ方式) 樹 枝 型	20.5	21.1	18.9	20.2	16.0	16.1	14.3	15.5	17.8
20～33	樹 枝 型 放射複合型	35.6	35.5	33.4	34.8	33.5	33.5	33.5	33.5	34.2
33～50	幹線樹枝型 幹線魚骨型	38.6	38.3	37.1	38.0	36.1	35.6	34.4	35.4	36.7
50～	幹線樹枝型 幹線魚骨型	41.2	40.9	39.7	40.6	38.7	38.2	37.0	38.0	39.3

表 28. トラクタ地形区分と最適集材路網型, 集材搬出方式および平均木寄せ距離

地形傾斜 (°)		～ 10	10 ～ 20	20 ～ 33	33 ～ 50	50 ～
地形傾斜の種類		平坦地	緩斜地	中斜地	急斜地	急峻地
集材路間隔 (m)		20	30 ～ 40	40 ～ 70	70 ～ 75	75 ～ 80
集材路網パターン 集材路網配置指標 (f 値) 集材路網型		～ 1.0 単線型 放射型	1.0 ～ 1.33 単線型 {放射型(皆伐) 樹枝型(択伐)}	1.33 ～ 1.57 樹枝型 放射複合型	1.57 ～ 1.67 幹線樹枝型 幹線魚骨型	1.67 ～ 2.0 幹線魚骨型 幹線樹枝型
集材搬出方式		フリー集材 走行タイプ	フリー集材 走行タイプ	併用集材 走行タイプ 路上集材 走行タイプ	路上集材 走行タイプ	路上集材 走行タイプ
択伐	平均木寄せ 距離 (m)	5.0	10.5	17.5	19.0	20.0
皆伐	平均木寄せ 距離 (m)	5.0	7.5	15.0	17.5	19.0

表 29. 地表障害物密度による最小集材所要人工数を与える最適平均木寄せ距離の増分距離

地表障害物 密度 λ	土場 1			土場 2			土場 3		
	0	0.075	0.15	0	0.075	0.15	0	0.075	0.15
放射型	0	1.08	3.27	0	0.85	2.58	0	0.94	2.84
単線型	0	1.07	2.86	0	0.78	2.10	0	0.85	2.78
放射複合型	0	0.81	2.21	0	0.67	1.84	0	0.75	2.05
樹枝型	0	0.77	2.06	0	0.61	1.63	0	0.69	1.84
幹線樹枝型	0	0.39	1.00	0	0.38	1.00	0	0.32	0.82
幹線魚骨型	0	0.37	1.07	0	0.38	1.10	0	0.34	0.97

(単位: m)

は幹線作業路を並設する幹線樹枝型および幹線魚骨型路網となる。

- ③ 最適な木寄せ幅は, 地形傾斜が急になるにしたがって大きくなり, 択伐地の方が皆伐地に比べて大きくなる。択伐地および皆伐地の集材量を $50 \text{ m}^3/\text{ha}$, $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ とした場合, その最適平均木寄せ距離は, 平坦地では約 5 m, 中斜地では 15～17.5 m, 急斜～急峻地では 17.5～20 m となる。また地表障害物による影響は, 障害物密度により表 29 に示す値を補正することにより得られる。図 64 は障害物による路線変更補正係数 η_λ と最適木寄せ幅の関係を示したものである。

- ④ 伐区当たりの土場面積を一定とした場合地形傾斜が平坦な場合ほど土場は分散した方がよい。

以上の結果からみて, トラクタ集材の最適集材方法を考察すると平坦地では, 道付けをしないで藪出し集材をする方法が良く, ウインチによる木寄せ距離は, なるべく短かくし, 伐倒木近くまで

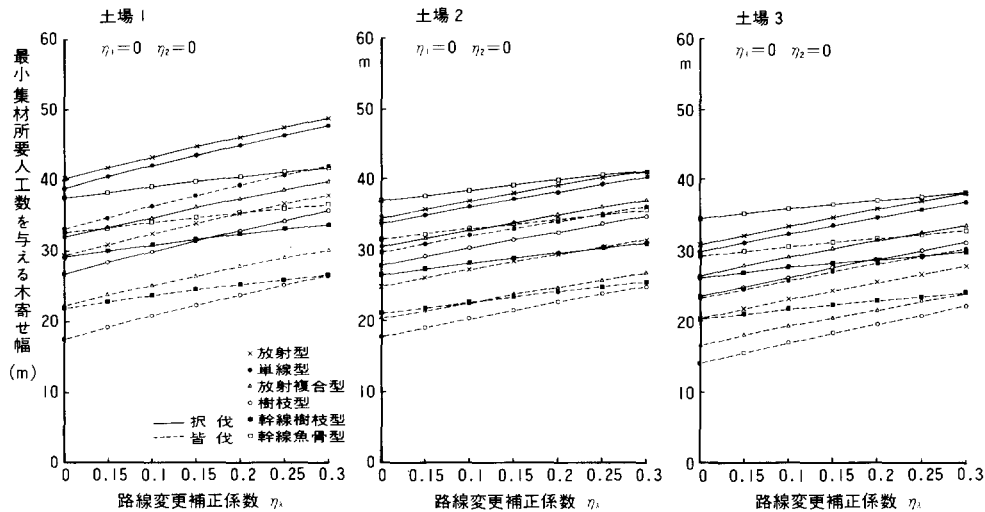


図 64. 地表障害物密度による路線変更補正係数 (η_λ) と最小集材所要人工数を与える木寄せ幅

トラクタを導入する方法が良いこと。中斜地では集材距離を最も小さくする樹枝型路網を適用することが好ましく、平均木寄せ距離が約 15 m になるように集材路を配置する方法となること。さらに急斜～急峻地では、集材率を確保するためには、幹線作業路を設ける必要があり、幹線作業路を並設した集材路型を適用した集材方法が好ましいこと、などが明らかとなった。

第 3 節 急傾斜地におけるトラクタ集材路網の配置

トラクタ集材作業にとって問題となるのは、地形が急斜～急峻地の集材である。トラクタ集材作業は、地形が平坦～緩斜地では、ある意味でどのような集材方法を行っても、ある程度の作業能率を確保することができる。しかし、地形傾斜が急になると、集材作業の能率が下がることもさることながら、技術面あるいは安全面から集材作業に大きな制約が課せられることになる。一方、トラクタ集材地形と称される 25° 以下の地形傾斜に対し、急斜～急峻地に区分されるトラクタ地形 (33% 以上) は、わが国においては、全トラクタ集材地形に対し、ほぼ 40% を占めていることを考え合わせると、この急斜～急峻地の地形の集材作業技術の解明や集材方法の確立こそトラクタ集材を云々するうえで不可欠なものとなる。

急傾斜地の集材に対して、集材路網を導入することを前提とした場合、前節の表 28 に示したように、急斜～急峻地では、幹線作業路を並設した路網を適用した集材方法が技術的にも経済的にも適しているという結論を得た。ここでは幹線作業路と作業路（主、支線）の複合集材路網の適正密度やそれぞれの集材路の合理的な分岐点および密度分担比について検討を行った。

3.1 幹線作業路と作業路および木寄せ幅に関する想定試験の結果

トラクタ集材作業の集材搬出工程に対して、幹線作業路と作業路の密度分担を如何にするか、あるいは幹線作業路と作業路をどのように配分し配置するかは、トラクタ集材作業の能率や経済性が

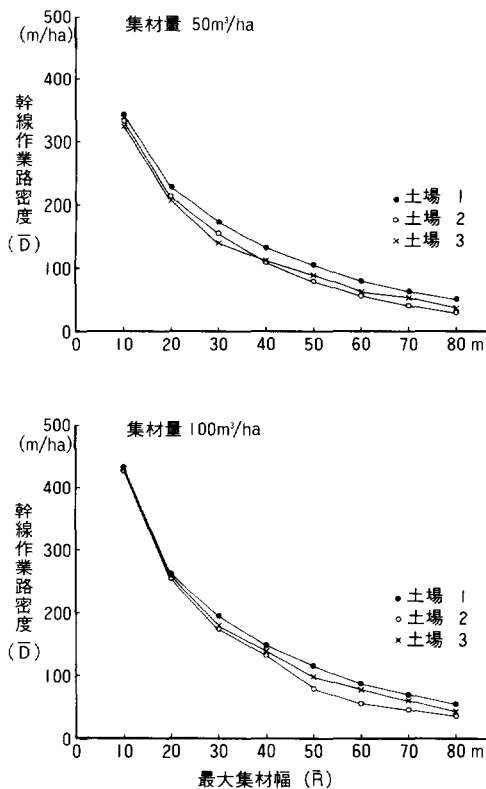


図 65. 幹線作業路密度と最大集材幅の関係

場合の諸関係を論じている。

図 65 は、最大集材幅 $\bar{R}$ と幹線作業路密度 $\bar{D}$ の関係を示したものである。図から、幹線作業路密度 $\bar{D}$ と最大集材幅 $\bar{R}$ の関係は、集材量や土場数の違いにほとんど関係なく、 $\bar{R}$ が大きくなるにしたがって $\bar{D}$ は小さくなる。土場数ごとにこれらの関係を求めると次式のとおりになり、式 (4.10) の一般式が得られた。

$$\text{土場数 1: } \bar{D} = 445.7104 e^{-0.0276 \bar{R}} \quad (r=0.9894)$$

$$\text{〃 2: } \bar{D} = 484.6318 e^{-0.0351 \bar{R}} \quad (r=0.9920)$$

$$\text{〃 3: } \bar{D} = 435.3453 e^{-0.0299 \bar{R}} \quad (r=0.9839)$$

$$\therefore \bar{D} = a_2 e^{-b_2 \bar{R}} \quad (4.10)$$

ただし、 a_2 、 b_2 は土場数の違いによる算出される係数。

3.1.2 最大集材幅ごとの作業路密度と木寄せ幅および集材率

第Ⅲ章の図 52 から、最大集材幅 $\bar{R}$ が 60 m の場合の幹線樹枝型および幹線魚骨型の集材率は作業路密度が高いほど大きくなり、木寄せ幅が大きいほど増大する関係を得たが、最大集材幅 $\bar{R}$ を変えた場合、すなわち、幹線作業路密度を変えた場合の集材率 τ と作業路密度 D および木寄せ幅 R の関係について示すと図 66 のとおりである。図は幹線樹枝型および幹線魚骨型路網につい

らみて重要な問題である。

ここでは、集材に際して、配設される幹線作業路の延長を独立変数として変えた場合、作業路の延長や木寄せ幅はどのように変化するか、またその際の集材率への影響はどの程度になるかなどの諸関係について明らかにした。

3.1.1 幹線作業路密度と最大集材幅

第Ⅲ章 2.2 で述べたとおり、幹線樹枝型および幹線魚骨型路網では、一定の木寄せ距離内で集材が可能となるように、あらかじめ幹線作業路を対象地に配設するが、この幹線作業路配設の際の最大到達距離を、最大集材幅と呼称してパラメータ $\bar{R}$ で与えると、幹線作業路密度は、最大集材幅の大小により変わってくる。ちなみに前節で論じた幹線樹枝型および幹線魚骨型路網のそれぞれの結果は、最大集材幅を一定 ($\bar{R} = 60$ m) とした場合のものである。ここでは最大集材幅 $\bar{R}$ を、変数として与えた

て最大集材幅 $\bar{R}$ を 30 m $\sim\infty$ の各場合について示したものである。図中の $\bar{R}=60$ は図 52 に相当するものであり、 $\bar{R}=\infty$ は幹線作業路が配設されない場合の路網型、すなわち幹線樹枝型では樹枝型路網に相当することになり、幹線魚骨型では転倒条件を考慮しない場合の単線型路網の場合に相当するものである。図から、最大集材幅 $\bar{R}$ ごとの $\ln \frac{\tau}{D}$ と木寄せ幅 R の関係は、ほぼ直線で表され、 $\bar{R}$ が大きくなるほど、同じ作業路密度と木寄せ幅に対して集材率は小さくなる。言い換えれば、幹線作業路が導入されるほど、この直線の傾きは急になることがわかる。また、この直線の傾きは、 $\bar{R}$ の増大に対し指数関数的減少を示し、それぞれの直線の切片は、 $R=0$ において一致している。そこで、これらの図から、 $\bar{R}=\infty$ のときの直線の傾き、すなわち幹線樹枝型では樹枝型路網の場合の傾き、幹線魚骨型では転倒条件を無視した単線型路網の場合の傾きに相当する傾きを k_2 とおき、それぞれの $\bar{R}$ についての $R=0$ の切片の値を k_1 として、最大集材幅 $\bar{R}$ ごとの直線の傾きの変化について図示すると図 67

のとおりである。図は土場 1 について横軸に $\bar{R}$ をとり、縦軸に傾き、 $\left\{ \frac{\ln \tau/D - \ln k_1}{R} - k_2 \right\}$ をとったものである。縦軸はそれぞれの $\bar{R}$ の直線の傾きから $\bar{R}=\infty$ の直線の傾きを減じた値であるが、この値は $\bar{R}$ が大きくなるにしたがって小さくなり、次の関係式で表された。

$$\left\{ \frac{\ln \frac{\tau}{D} - \ln k_1}{R} - k_2 \right\} = 0.1652 e^{-0.0306 \bar{R}} \quad (r = 0.9852)$$

$$\therefore \ln \frac{\tau}{D} = \ln k_1 + (k_2 + 0.1652 e^{-0.0306 \bar{R}}) R \quad (4.11)$$

表 30 は、幹線樹枝型および幹線魚骨型路網について土場数ごとに k_1, k_2 を示したものである。式 (4.11) は、 $\bar{R}=\infty$ のとき、第 III 章の式 (3.6) で表されることになり、式 (3.6) によって与えられた表 17 はこの場合の $\bar{R}=60$ の幹線樹枝型および幹線魚骨型の場合となる。集材率 100% ($\tau=1$) のとき、パラメータ $\bar{R}$ に対し、作業路密度 D と木寄せ幅 R の関係は次の一般式で示される。

$$D = \frac{1}{k_1} e^{-(k_2 + a_1 e^{-b_1 \bar{R}}) R} \quad (4.12)$$

ただし、 a_1, b_1 は算出される係数である。

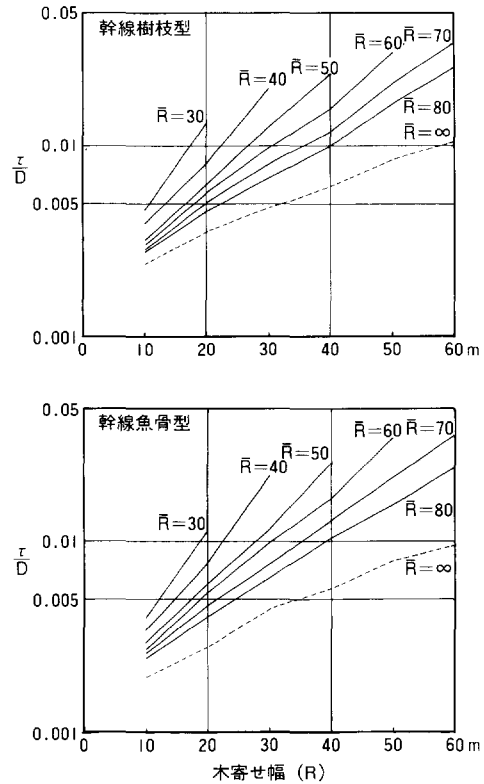


図 66. 最大集材幅 ($\bar{R}$) ごとの集材率と木寄せ幅および作業路密度の関係

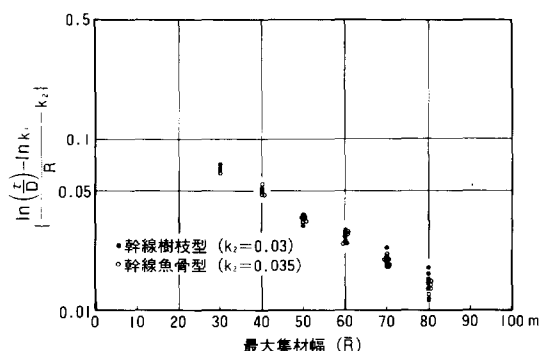


図 67. 各直線の傾き (図 66) から $\bar{R} = \infty$ の直線の傾きを減じた値と最大集材幅 ($\bar{R}$) の関係

表 30. 係数 k_1 , k_2 の算定結果

係数	幹線樹枝型			幹線魚骨型		
	土場 1	土場 2	土場 3	土場 1	土場 2	土場 3
k_1	0.1661 E-2	0.1510 E-2	0.1684 E-2	0.1409 E-2	0.1353 E-2	0.1471 E-2
k_2	0.0319	0.0401	0.0363	0.0349	0.0449	0.0384

3.1.3 地形傾斜と最大集材幅、木寄せ幅および集材率

トラクタは、地形傾斜が急になると林内への導入は不可能となり、集材率を確保するには、木寄せ幅を大きくするか、あるいは幹線作業路を並設して集材路網全体の密度を高くする必要がある。

図 68 は地形傾斜ごとの最大集材幅 $\bar{R}$ を変えた場合の集材率 τ と木寄せ幅 R の関係を示したものである。図の $\bar{R} = 60$ m は第Ⅲ章の図 47 の場合に相当する。図から集材率 τ は木寄せ幅が大きいほど、大きくなり、同じ木寄せ幅に対して最大集材幅 $\bar{R}$ が小さいほど、すなわち、幹線作業路の密度が高いほど、大きくなる。また、それぞれの地形傾斜における集材率 τ と木寄せ幅 R の関係は、 $R \geq 10$ m では、木寄せ幅 R の増大とともに集材率 τ は直線的に増大しており、その増加傾向、は最大集材幅 $\bar{R}$ が小さい場合ほど急増する傾向が示された。

図 69 は、図 68 について、 $R \geq 10$ m の場合の直線の傾き $\left(\frac{\tau - \tau_{R=10}}{R - R_{10}}\right)$ と地形傾斜 θ の関係を示したものである。図から、 $\left(\frac{\tau - \tau_{R=10}}{R - R_{10}}\right)$ の値は、 θ が大きくなるにしたがってほぼ直線的に増大し、最大集材幅 $\bar{R}$ が大きい場合ほどその増加傾向は小さくなる。そこで、これらの関係から、 $\left(\frac{\tau - \tau_{R=10}}{R - R_{10}}\right)$ の値を θ で割った値、すなわち、 $\left(\frac{\tau - \tau_{R=10}}{(R - R_{10}) \tan \theta}\right)$ の値を縦軸にとり、横軸に最大集材幅 $\bar{R}$ をとって図示すると図 70 のとおりとなり、式 (4.13) の関係が得られた。

$$\frac{\tau - \tau_{R=10}}{(R - R_{10}) \tan \theta} = 0.015 + e^{-(0.0382 \bar{R} + 2.0318)} \quad (r = 0.9687)$$

$$\therefore \tau = \tau_{R=10} + (R - R_{10}) \{0.015 + 0.1311 e^{-0.0382 \bar{R}}\} \tan \theta \quad (4.13)$$

また、木寄せ幅 R が 10 m の場合の集材率 $\tau_{R=10}$ と地形傾斜 θ の関係は図 71 のとおりである。

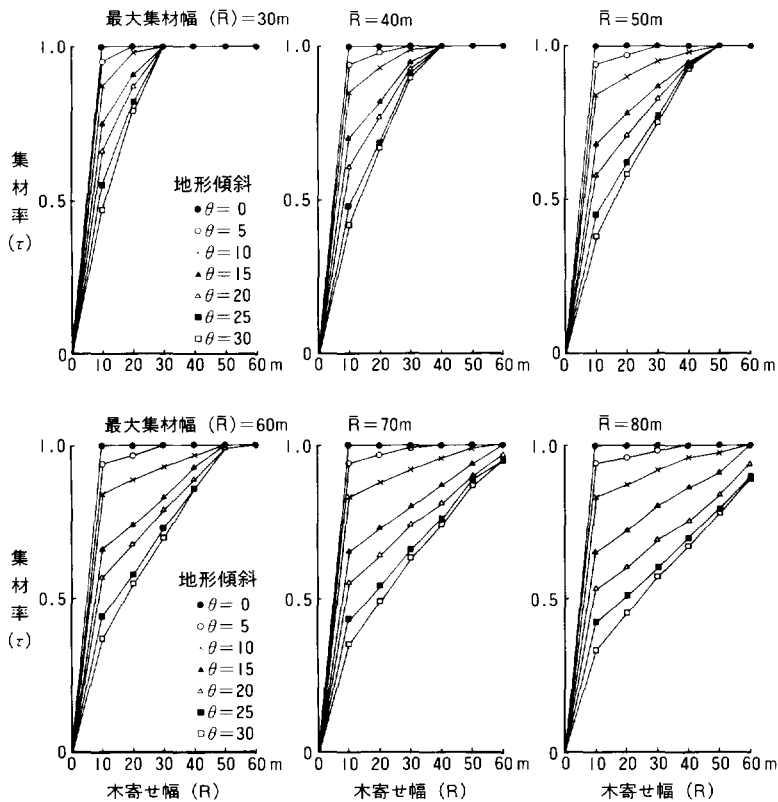


図 68. 最大集材幅ごとの地形傾斜と集材率および木寄せ幅（幹線樹枝型路網の場合）

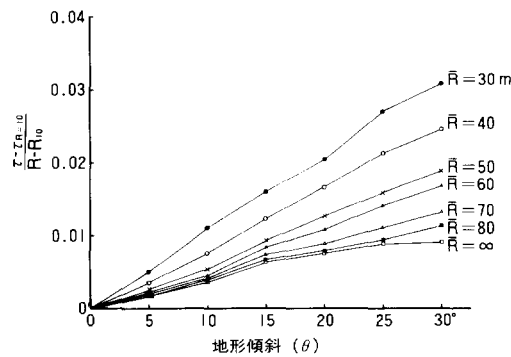


図 69. 木寄せ幅の増大にともなう集材率の増加比と地形傾斜の関係

図中の $\bar{R} = \infty$ の場合および $\bar{R} = 60 \text{ m}$ の場合は、それぞれ図 50 の樹枝型と幹線樹枝型の場合に相当する。図 50 のところでも述べたとおり $\ln \frac{1}{1-\tau_{R=0}}$ の対数値 $\ln \left(\ln \frac{1}{1-\tau_{R=0}} \right)$ は、地形傾斜 θ の増大に対し直線的減少関数となり、その直線の減少の傾きは最大集材幅 $\bar{R}$ が大きくなるほど

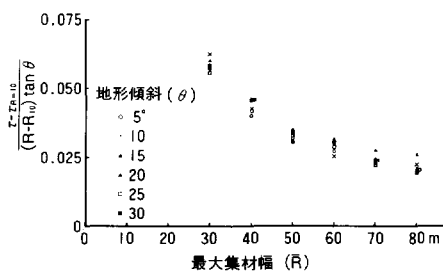


図 70. 木寄せ幅および地形傾斜の増大にともなう集材率の増加比と最大集材幅の関係

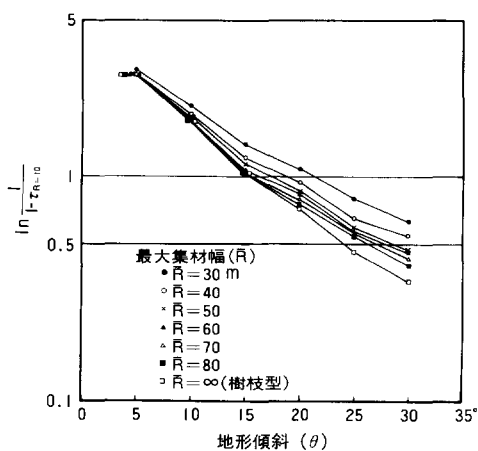


図 71. 最大集材幅ごとの木寄せ幅 10 m の場合の集材率と地形傾斜の関係

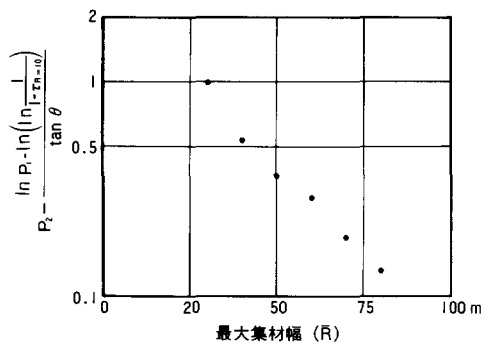


図 72. 図 71 の直線の傾きと最大集材幅の関係

小さくなり、 $\bar{R} = \infty$ で樹枝型路網の場合の傾きに一致することになる。また各 $\bar{R}$ ごとのこの直線は $\theta = 0^\circ$ において $\bar{R} = \infty$ の場合の切片に一致することが示された。そこで $\bar{R} = \infty$ の場合、すなわち樹枝型路網の場合のこの直線の切片と傾きを、それぞれ $\ln P_1$ および P_2 とすると、地形傾斜

の増大にともなう各直線の傾きの増加率 $\left(P_2 - \frac{\ln P_1 - \ln\left(\ln \frac{1}{1-\tau}\right)}{\tan \theta}\right)$ と最大集材幅 $\bar{R}$ の関係は図 72 に示すとおりとなり、これらの関係を求めると式 (4.14) となる。

$$\ln \left[P_2 - \frac{\ln P_1 - \ln\left(\ln \frac{1}{1-\tau}\right)}{\tan \theta} \right] = -0.0385 \bar{R} + 1.0201 \quad (r = 0.9916)$$

$$\therefore \tau_{R=10} = 1 - e^{-P_1 e^{-q \tan \theta}} \quad (4.14)$$

ただし、 $q = P_2 + 2.7735 e^{-0.0385 \bar{R}}$ である。

ゆえに、最大集材幅 $\bar{R}$ をパラメータとした場合の集材率 τ と木寄せ幅 R の関係は、式 (4.13) と式 (4.14) から、式 (4.15) が算定される。

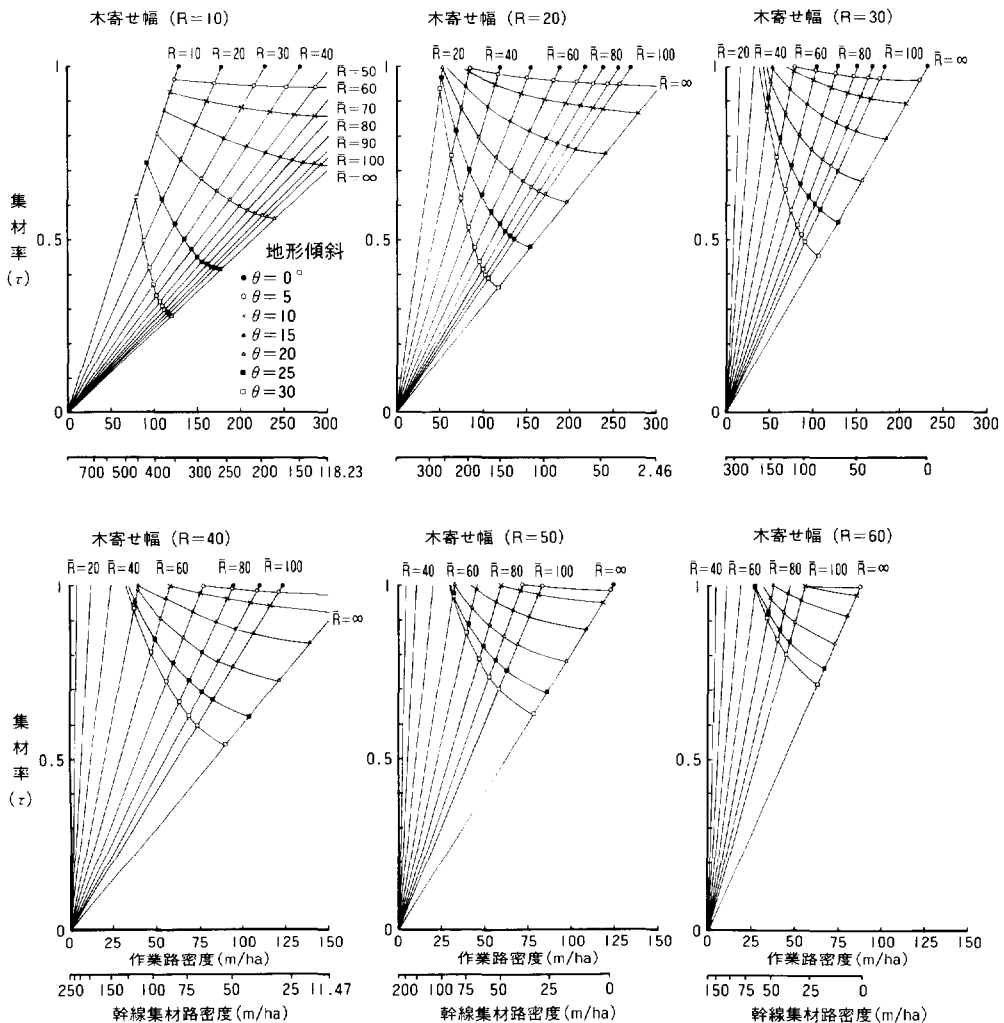


図 73. 地形傾斜ごとの集材率と幹線作業路密度、作業路密度および木寄せ幅の関係

$$\tau = (R - R_{10}) \{0.015 + 0.1311 e^{-0.0382 \bar{R}}\} \tan \theta + \{1 - e^{-P_1 e^{-q \tan \theta}}\} \quad (4.15)$$

ただし, $q = P_2 + 2.7735 e^{-0.0385 \bar{R}}$, $P_1 = 3.9646$, $P_2 = 4.3155$ 。

以上, 地形傾斜ごとの集材率について幹線作業路密度, 作業路密度および木寄せ幅とその集材率の関係は式 (4.10), 式 (4.11) および式 (4.15) から求まり, これらの関係について図示すると図 73 のとおりである。図から, 地形傾斜が平坦の場合, 作業路は林内への導入が容易のため, 幹線作業路を配設しなくても, 集材率はほぼ 100% 確保される。しかし地形が急の場合では, 作業路の林内への導入は困難となり, 幹線作業路を配設しないと集材率は確保されなくなる。特に木寄せ幅が小さい場合では幹線作業路密度を高くしなければならない。つまり, 急傾斜地では集材率を確保するためには, 木寄せ幅を大きくするかあるいは幹線作業路密度を高くするかのいずれかが必要となる。図 73 は, 各種現場の地形傾斜条件に対してそれぞれ集材率を与えてやると, その集材率を確保するための必要な幹線作業路密度および木寄せ幅を図から簡易に算定することができる。

図 74 は, 地形傾斜ごとの集材率 90% および 95% を確保するための必要な幹線作業路密度 $\bar{D}$ と木寄せ幅 R の関係を示したものである。当該の集材率を確保するためには図中の曲線より上方すなわちその曲線の値より大きい幹線作業路密度 $\bar{D}$ と木寄せ幅 R が必要となる。また, 集材率を確保するための幹線作業路密度 $\bar{D}$ と木寄せ幅 R は逆関数となり, $\bar{D}$ が大きいと R は小さくても集材率は確保されること, 地形が平坦～緩斜地では, 幹線作業路密度の大小はほとんど関係な

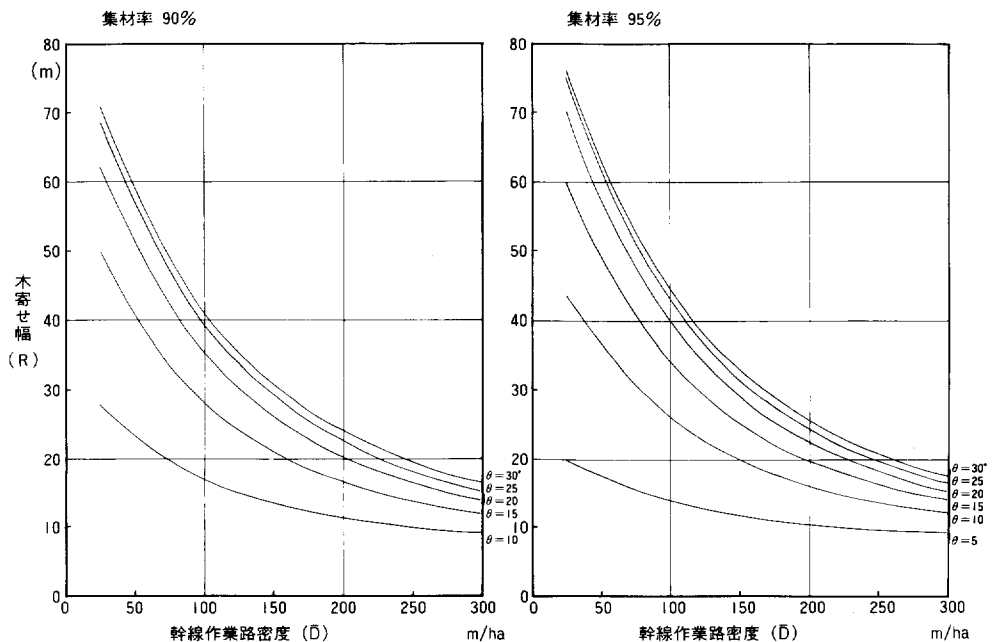


図 74. 地形傾斜ごとの集材率を確保するための幹線作業路密度と木寄せ幅

く、10 m 以下の木寄せ幅でも集材率は確保されること、しかし地形傾斜が急な場合では幹線作業路の密度が小さいときは、木寄せ幅をかなり大きくしないと集材率は確保されないこと。また、この場合、幹線作業路密度をある程度高くすると集材率を確保するための木寄せ幅は急速に減少すること、などが図からわかる。

3.2 幹線作業路と作業路および木寄せ幅の合理的な分岐点

急斜～急峻地（33% 以上）ではトラクタ集材を実行する場合、集材を可能にするには木寄せ距離を長くする必要があるが、木寄せ距離にも限度がありトラクタを林内奥深く導入させるためには幹線作業路の並設が不可欠となる。

しかし、木寄せ・搬出工程の経済的合理化を計るためには、作設負担の大きい幹線作業路を過大に設けることは好ましくなく、それぞれの工程間の作業分担あるいは幹線作業路、作業路および木寄せ距離の分岐点をどこにおくかということが重要なポイントとなる。

ここでは急傾斜地を対象とするトラクタ集材作業に対して、木寄せ作業工程と集材搬出工程の分

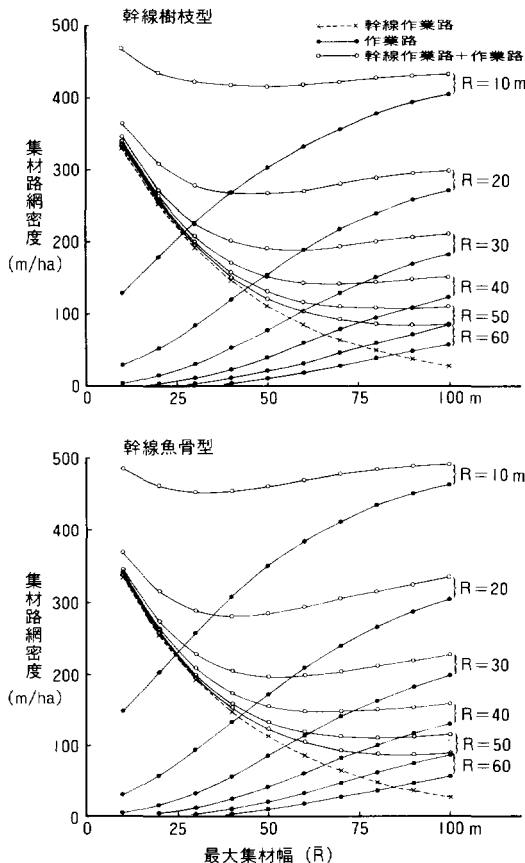


図 75. 幹線作業路密度と作業路密度および木寄せ幅の関係

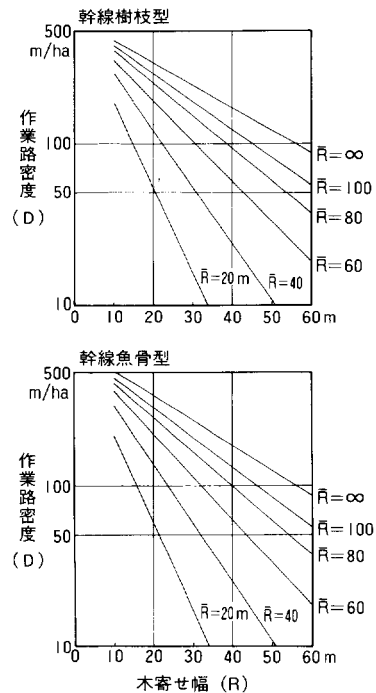


図 76. 最大集材幅ごとの作業路密度と木寄せ幅の関係

担および幹線作業路と作業路の分岐点について集材所要人工数を最小にする観点から検討を加えた。

3.2.1 幹線作業路密度と作業路密度

作業路の延長距離は、木寄せ距離を一定とした場合、幹線作業路の延長が長くなるほど、短かくてすむ。

図75は、幹線樹枝型および幹線魚骨型路網について、木寄せ幅ごと幹線作業路と作業路（ただし幹線樹枝型路網では支線作業路、幹線魚骨型路網では主線作業路とした。）密度の関係を示したものである。図は、横軸に最大集材幅 $\bar{R}$ をとり、縦軸に幹線作業路と作業路の集材路網密度をとったものである。式(4.10)からも明らかなように、最大集材幅 $\bar{R}$ が大きくなるにしたがって幹線作業路密度 $\bar{D}$ は小さくなり、作業路密度 D は、逆に幹線作業路密度 $\bar{D}$ が小さくなったぶん大きくなる。また、図76に示すように同一の幹線作業路密度 $\bar{D}$ に対して木寄せ幅 R が小さいほど作業路密度 D は大きくなる。つまり幹線作業路と作業路の合計の集材路網密度は木寄せ幅が小さいほど大きくなり、合計の集材路網密度は木寄せ幅が40m以下の場合では、きわめて緩慢なカーブであるが、ある一定の最大集材幅において最小値を有している。

また、図77は、幹線作業路密度 $\bar{D}$ と作業路密度 D の関係を示したものであるが、作業路密度は幹線作業路密度が大きくなるにしたがって指数関数的に減少しており、木寄せ幅 R が小さいほど、合計の集材路網密度 ($\bar{D} + D$) は大きくなり、各木寄せ幅 R に対して、幹線魚骨型路網の方が幹線樹枝型路網に比べ合計の集材路網密度 ($\bar{D} + D$) は大きくなることがわかった。

3.2.2 最小所要人工数を与える木寄せ幅および幹線作業路と作業路の分岐比

第1節で述べたとおり、集材に要する費用あるいは所要人工数は一定の木寄せ距離または一定の集材路網密度において最小値を有することを示した。ここでは集材所要人工数を最小にする木寄せ幅、幹線作業路密度および作業路密度の関係について考察した。

伐倒作業、土場作業の人工数および土場敷の面積を一定とした場合の ha 当たりの所要人工数

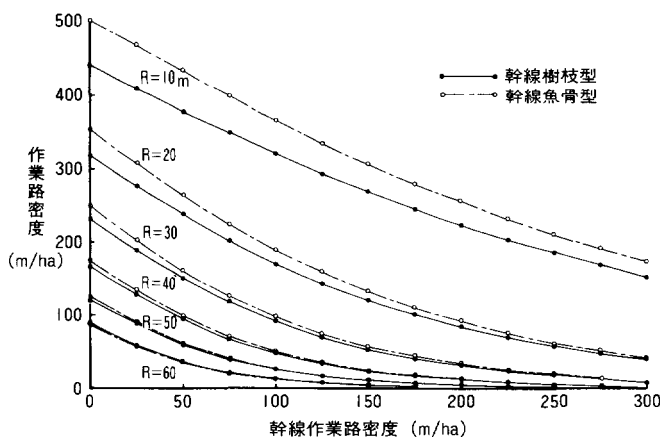


図 77. 幹線作業路密度と作業路密度および木寄せ幅の関係

T_L は、式 (4.5) のとおりである。そこで式 (4.5) の作業路密度 D および幹線作業路密度 $\bar{D}$ についてそれぞれ式 (4.10) および式 (4.12) の関係を代入すると、所要人工数 T_L は式 (4.16) に示すとおり、木寄せ幅 R と最大集材幅 $\bar{R}$ の関数で表される。

$$T_L = AR + \frac{B_2(1+\eta_\lambda)(1+\eta_2)}{k_1} e^{-(k_2+a_1 e^{-b_1 \bar{R}})R} + B_1 a_2 (1+\eta_1) e^{-b_2 \bar{R}} + T_s \quad (4.16)$$

ここで、 R および $\bar{R}$ をそれぞれ独立変数とすると、所要人工数 T_L を最小にする最良計画は、

$$\begin{aligned} \frac{dT_L}{dR} &= 0, \quad \frac{dT_L}{d\bar{R}} = 0 \quad \text{より} \\ \frac{dT_L}{dR} &= A - \frac{B_2(1+\eta_\lambda)(1+\eta_2)}{k_1} (k_2 + a_1 e^{-b_1 \bar{R}}) e^{-(k_2+a_1 e^{-b_1 \bar{R}})R} = 0 \\ \therefore R &= -\frac{1}{t} \ln \frac{A k_1}{B_2 t (1+\eta_\lambda)(1+\eta_2)} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_L}{d\bar{R}} &= \frac{a_1 b_1 B_2 R (1+\eta_\lambda)(1+\eta_2)}{k_1} e^{-\{b_1 \bar{R} + (k_2+a_1 e^{-b_1 \bar{R}})R\}} \\ &\quad - a_2 b_2 B_1 (1+\eta_1) e^{-b_2 \bar{R}} = 0 \\ \therefore R e^{-tR} &= \frac{a_2 b_2 B_1 k_1 (1+\eta_1)}{a_1 b_1 B_2 (1+\eta_\lambda)(1+\eta_2)} e^{-(b_2-b_1) \bar{R}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

となり、式 (4.17) と式 (4.18) から、式 (4.19) を得る。

$$R = \frac{a_2 b_2 B_1 (1+\eta_1)}{a_1 b_1 A} t e^{-(b_2-b_1) \bar{R}} \quad (4.19)$$

ただし、 $t = (k_2 + a_1 e^{-b_1 \bar{R}})$ 。

そこで、上式のうち2式の交点について、判別式から極値条件を検討することにより最小所要人工数を与える解が得られる。

トラクタ集材作業のそれぞれの要素作業の人工数について、次のように、人工数比率 $Z_1 \sim Z_3$ で与えると、式 (4.16) の各係数 A, B_1, B_2 と $Z_1 \sim Z_3$ の関係は式 (4.20) のとおり表される。

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{\text{作業路作設人工数 (m 当たり)}}{\text{幹線作業路作設人工数 (m 当たり)}} = \frac{\bar{b}_2}{\bar{b}_1} \quad (0 < Z_1 \leq 1) \\ Z_2 &= \frac{\text{集材搬出作業人工数 (m 当たり)}}{\text{木寄せ・荷掛け作業人工数 (m 当たり)}} = \frac{\bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_3}{\bar{a}_2 \bar{W}} \quad (0 < Z_2 \leq 1) \\ Z_3 &= \frac{\text{集材搬出作業人工数 (m 当たり)}}{\text{幹線作業路作設人工数 (m 当たり)}} = \frac{\bar{a}_3 \bar{W} \bar{k}_3}{2 \bar{b}_1} \quad (0 < Z_3 \leq 1) \\ \left. \begin{aligned} \frac{B_1}{A} &= Z_2 \left(1 + \frac{1}{Z_3}\right) \\ \frac{B_2}{A} &= Z_2 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4.20) \end{aligned}$$

$$\frac{B_2}{B_1} = Z_1 + (1 - Z_1) \frac{Z_3}{Z_3 + 1}$$

図 78 は、1 例として幹線樹枝型路網 ($Z_1=0.3333$, $Z_2=0.05$, $Z_3=0.1666$), 幹線魚骨型路網 ($Z_1=0.6666$, $Z_2=0.0333$, $Z_3=0.1666$) の場合の所要人工数について木寄せ幅 R と幹線作業路密度 $\bar{D}$ の関係を 3 次元図で示したものである。ただし、 A は表 22 から 0.1472 としたものであり、 $\eta_3=0$, $\eta_1=0$, $\eta_2=0$ の場合である。図から、幹線樹枝型路網では所要人工数を最小にする極値は存在しない。したがって最小所要人工数を与える木寄せ幅 R および幹線作業路密度 $\bar{D}$ は存在しないことがわかる。しかし、木寄せ幅 R を一定とした場合、幹線作業路密度 $\bar{D}$ が小さいほど、所要人工数は小さくなり、幹線作業路密度 $\bar{D}$ を一定とした場合、任意の木寄せ幅 R において極小値を有している。図中記載の白丸印はそれぞれの幹線作業路密度 $\bar{D}$ に対して最小所要人工数を与える木寄せ幅 R の値を示したものである。

幹線樹枝型では、パラメータ R と $\bar{D}$ に対する最小所要人工数を与える極値は存在しないが、 $\bar{D} \geq 0$ の条件に対して所要人工数を最小にする R および $\bar{D}$ は、 $\bar{D}=0$ の場合である。つまり $\bar{D}=0$ の条件下で所要人工数を最小にする木寄せ幅 R のとき、最小所要人工数を与えることになる。

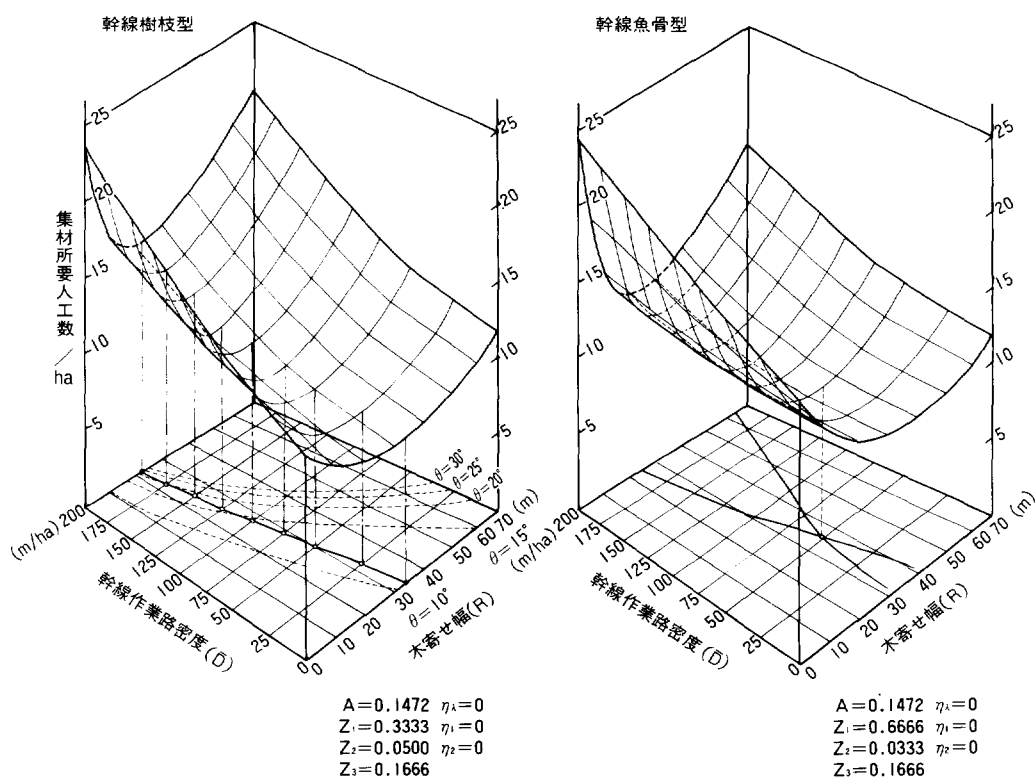


図 78. 幹線作業路密度、木寄せ幅と集材所要人工数の関係

幹線魚骨型路網では所要人工数を最小にする極値が存在する。図中の白丸の点、すなわち式 (4.17) と式 (4.19) 両曲線の交点となる R と $\bar{D}$ において最小所要人工数を与えることになる。

図 79 はそれぞれ 3 例の $Z_1 \sim Z_3$ について最小所要人工数を与える木寄せ幅 R と幹線作業路密度 $\bar{D}$ を示したものである。図から幹線樹枝型路網では 3 例の場合とも交点を有することがなく、最小所要人工数を与える極値は存在しないことがわかる。また幹線魚骨型路網では、3 例とも 2 曲線の交点が求まり、最小所要人工数を与える木寄せ幅と幹線作業路密度が存在することがわかる。

しかし、ここで述べてきた最小所要人工数を与える木寄せ幅や幹線作業路密度は平坦～緩斜地に適用できるものであり、特に幹線樹枝型路網では、本節の 3.1.3 で論じたとおり、地形傾斜が急になると集材率を確保するためには木寄せ幅および幹線作業路密度に条件が加えられることになる。ただし、幹線魚骨型路網では集材率はほぼ 100% となるので、地形傾斜ごとのこの条件は考慮しなくてもよいことになる。図 78 の幹線樹枝型における図中の破線は集材率 90% 以上を確保するための地形傾斜ごとの木寄せ幅 R と幹線作業路密度 $\bar{D}$ の条件 (図 74) を示しているが、各地形傾斜に対して集材率を確保するためには、この破線以上の R および $\bar{D}$ が必要となり、先に述べた所要人工数を最小にする R と $\bar{D}$ の値は、地形傾斜が 15° 以上では条件を満たさなくなることがわかる。要するに各地形傾斜に対して、条件を満足し、しかも所要人工数を小さくするためには、 R と $\bar{D}$ が記載の破線で示す曲線上にあることが必要条件となる。

また一方所要人工数を最小にするための R と $\bar{D}$ の関係は式 (4.19) で与えられることから、地形傾斜ごとの最小所要人工数を与える R と $\bar{D}$ は、式 (4.18) と式 (4.19) の両曲線の交点はその解となる。

図 80 は、それぞれの人上数比率 $Z_1 \sim Z_3$ について、集材率 90% の場合の式 (4.15) と式 (4.19) の 2 曲線の交点を示したものである。図から、最小所要人工数を与える木寄せ幅 R と幹線作業路

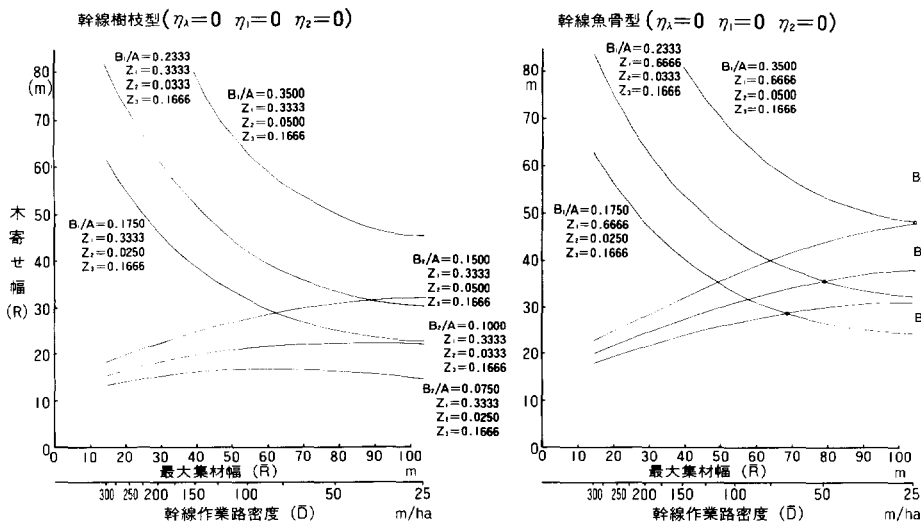


図 79. 最小集材所要人工数を与える木寄せ幅と幹線作業路密度

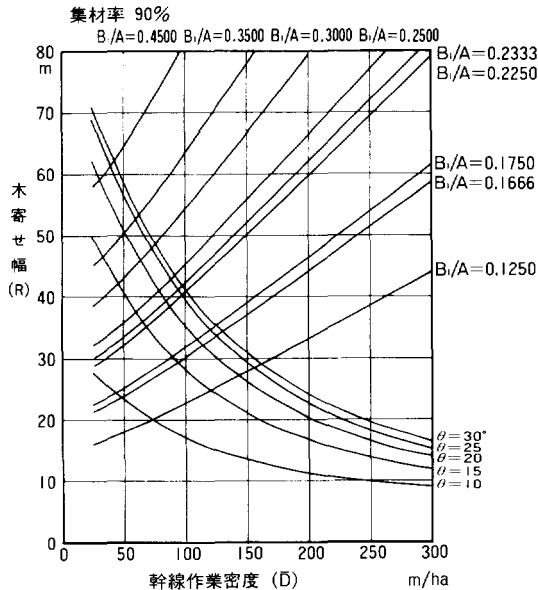


図 80. 地形傾斜を考慮した場合の最小集材所要人工数を与える木寄せ幅と幹線作業路密度 (集材率 90%)

密度 $\bar{D}$ は、地形傾斜が急になるにしたがって大きくする必要がある。また、地形傾斜ごとの最小所要人工数を与える木寄せ幅 R と幹線作業路密度 $\bar{D}$ は、 Z_2 と Z_3 によって決まり、 $\frac{B_1}{A}$ の値が小さいほど、その幹線作業路密度は高くなり、木寄せ幅は小さくなることがわかる。

以上これらの関係から、急傾斜地に対する集材路網型として幹線樹枝型および幹線魚骨型の路網について、それぞれの $Z_1 \sim Z_3$ の場合の最小所要人工数を与える木寄せ幅と全体の集材路網密度および幹線作業路密度と作業路密度の適正分担比について取りまとめると表 31 と表 32 のとおりである。

表 31 から幹線樹枝型路網についてみると、

表 31. 最小集材所要人工数を与える木寄せ幅と集材路網密度および幹線作業路と作業路 (支線) の分担比

幹線樹枝型

(集材率 90% 以上)

地形傾斜		$\theta = 15^\circ$			$\theta = 20^\circ$			$\theta = 25^\circ$			$\theta = 30^\circ$		
Z_2	Z_3	0.125	0.1666	0.250	0.125	0.1666	0.250	0.125	0.1666	0.250	0.125	0.1666	0.250
0.0250	R	35.4	30.3	24.8	38.6	33.3	27.2	40.3	34.8	28.5	41.1	35.4	29.3
	$\bar{D}$	69.0	89.5	121.0	87.5	110.5	144.0	97.0	121.5	156.0	101.5	125.0	162.5
	D	93.0	98.6	103.9	61.6	64.4	70.0	48.9	50.9	55.7	43.5	46.6	48.8
	$\bar{D} + D$	162.0	188.1	224.9	149.1	174.9	214.0	145.9	172.4	211.7	145.0	171.6	211.3
	ν	0.43	0.48	0.54	0.59	0.63	0.67	0.67	0.71	0.74	0.70	0.73	0.77
0.0333	R	42.2	36.2	29.4	46.2	39.5	32.3	48.0	41.2	33.8	48.8	41.9	34.5
	$\bar{D}$	45.5	66.0	94.0	64.5	84.5	115.0	72.5	93.8	126.5	76.0	97.5	131.0
	D	90.0	92.4	99.3	56.3	60.9	65.6	41.2	48.4	51.4	40.9	43.9	46.3
	$\bar{D} + D$	135.5	158.4	193.3	120.8	145.4	180.6	117.7	142.2	177.9	116.9	141.4	177.3
	ν	0.34	0.42	0.49	0.53	0.58	0.64	0.62	0.66	0.71	0.65	0.69	0.74
0.0500	R	>56.5	46.7	37.7	59.3	50.8	41.2	61.6	52.8	43.1	62.5	53.8	43.7
	$\bar{D}$	0	33.0	60.0	31.0	52.0	78.5	40.0	60.5	88.5	43.0	64.0	91.8
	D		87.1	92.3	54.6	54.8	60.0	41.9	43.2	46.6	37.9	38.5	42.8
	$\bar{D} + D$		120.1	152.3	85.6	106.8	138.5	81.9	103.7	135.1	80.9	102.5	134.6
	ν	0	0.28	0.39	0.36	0.49	0.57	0.49	0.58	0.66	0.53	0.62	0.68

注) Z_1 = 作業路作設人工数 (m 当たり) / 幹線作業路作設人工数 (m 当たり)

Z_2 = 集材搬出作業人工数 (m 当たり) / 木寄せ・荷掛け作業人工数 (m 当たり)

Z_3 = 集材搬出作業人工数 (m 当たり) / 幹線作業路作設人工数 (m 当たり)

$$\nu = \frac{\bar{D}}{\bar{D} + D}$$

表 32. 最小集材所要人工数を与える木寄せ幅と集材路網密度および幹線作業路と作業路(主線)の分担比
幹線魚骨型 (集材率90%以上)

Z_2	Z_1	0.5			0.6666			1		
	Z_3	0.125	0.1666	0.250	0.125	0.1666	0.250	0.125	0.1666	0.250
0.0250	$\frac{R}{D}$	31.2	25.7	19.6	34.6	28.8	22.5	38.4	32.4	25.6
	$\frac{D}{D}$	27.4	40.4	54.7	50.8	67.3	86.3	75.6	93.2	118.5
	$\frac{D}{D+D}$	188.8	215.1	260.8	126.8	144.6	177.2	76.5	89.1	109.6
	$\frac{D}{D+D}$	216.2	255.5	315.5	177.6	211.9	263.5	152.1	182.3	228.1
	ν	0.13	0.16	0.17	0.29	0.32	0.33	0.50	0.51	0.52
0.0333	$\frac{R}{D}$	40.6	32.6	25.4	42.7	35.7	28.0	46.8	39.4	31.2
	$\frac{D}{D}$	0	30.2	49.7	33.5	50.4	72.5	54.4	72.5	97.7
	$\frac{D}{D}$	171.9	173.1	202.2	107.1	120.6	143.9	65.4	75.2	91.6
	$\frac{D}{D+D}$	171.9	203.3	251.9	140.6	171.0	216.4	119.4	147.7	189.3
	ν	0	0.15	0.20	0.24	0.30	0.34	0.45	0.49	0.52
0.0500	$\frac{R}{D}$	52.2	45.8	35.2	59.0	48.1	38.9	62.4	52.1	41.2
	$\frac{D}{D}$	0	0	31.4	0	24.6	47.7	23.9	43.0	68.2
	$\frac{D}{D}$	114.7	143.4	152.8	90.5	96.1	106.5	53.7	60.4	72.0
	$\frac{D}{D+D}$	114.7	143.4	184.2	90.5	120.7	154.2	77.6	103.4	140.2
	ν	0	0	0.17	0	0.20	0.31	0.31	0.42	0.49

注) Z_1 = 作業路作設人工数 (m 当たり) / 幹線作業路作設人工数 (m 当たり)

Z_2 = 集材搬出作業人工数 (m 当たり) / 木寄せ・荷掛け作業人工数 (m 当たり)

Z_3 = 集材搬出作業人工数 (m 当たり) / 幹線作業路作設人工数 (m 当たり)

$$\nu = \frac{D}{D+D}$$

所要人工数を最小にする木寄せ幅は, Z_2 が大きいほど大きくなり, Z_3 が大きいほど小さくなる。また幹線作業路密度は Z_2 が大きいほど小さくなり, Z_3 が大きいほど大きくなる。さらに, 幹線作業路と作業路の適正分担比として全体の集材路網密度に対する幹線作業路密度の比率を定義し, これを適正分担比 ν とすると, ν は Z_2 が大きいほど小さくなり, Z_3 が大きいほど大きくなる。すなわち幹線作業路作設人工数 (m 当たり) が小さいほど, および木寄せ作業人工数 (m 当たり) が大きいほど, 全体の集材路網密度は大きくなり, その内の幹線作業路の割合も大きくなる。さらに地形傾斜が急になるほど, 同一の Z_2 および Z_3 に対し, 木寄せ幅および幹線作業路密度は大きくなり, 全体の集材路網密度は小さくなる。したがって全体の集材路網密度に対する幹線作業路密度の比率すなわち, 適正分担比 ν は, 地形傾斜が急になるほど大きくなる。

同様に表 32 の幹線魚骨型路網についてみる。幹線魚骨型路網の場合は, 各地形傾斜に対してこの表が適用でき, それぞれ $Z_1 \sim Z_3$ を与えることによって最小所要人工数を与える木寄せ幅や適正分担比 ν が推定できる。表から最小所要人工数を与える木寄せ幅は Z_1, Z_2 が大きいほど大きくなり, Z_3 が小さいほど大きくなる。また最小所要人工数を与える幹線作業路密度は Z_1, Z_3 が大きいほど大きくなり, Z_2 が大きいほど小さくなる。さらに全体の集材路網密度は Z_1, Z_2 が大きいほど

小さくなり、 Z_3 が大きいほど大きくなる。したがって適正の分担比 ν は Z_1, Z_3 が大きいほど大きくなり、 Z_2 が大きいほど小さくなる。

表 22 から択伐地および皆伐地に両集材路網型を適用すると次のことがいえる。

まず幹線樹枝型に対する $Z_1 \sim Z_3$ はそれぞれ択伐地では $Z_1 = 0.25, Z_2 = 0.051, Z_3 = 0.154$, 皆伐地では $Z_1 = 0.25, Z_2 = 0.039, Z_3 = 0.182$ となり、表 31 から、択伐地では地形傾斜 $\theta = 20^\circ$ では最小所要人工数を与える平均木寄せ距離は約 25~30 m, 適正分担比は約 36~49% となる。地形傾斜 $\theta = 30^\circ$ では、その平均木寄せ距離は約 27~32 m, 適正分担比は約 53~62% となる。また同様に皆伐地では最適平均木寄せ距離および適正分担比は、それぞれ地形傾斜 $\theta = 20^\circ$ のとき、約 16~20 m, 58~64%, 地形傾斜 $\theta = 30^\circ$ のとき、約 18~22 m, 69~74% となる。すなわち、皆伐地は択伐地に比べ最小所要人工数を与える平均木寄せ距離は小さくなり、全体の集材路網密度は大きくなるが幹線作業路の分担割合を大きくすることが効果的となる。つまり、トラクタ集材地形の急傾斜地に対する適正な幹線作業路の分担比は、択伐地では約 40~60%, 皆伐地では約 60~70% となる。

幹線魚骨型路網に対する $Z_1 \sim Z_3$ は、それぞれ択伐地では $Z_1 = 0.67, Z_2 = 0.056, Z_3 = 0.169$, 皆伐地では、 $Z_1 = 0.67, Z_2 = 0.054, Z_3 = 0.253$ となり、表 32 から、択伐地では最小所要人工数

を与える平均木寄せ距離は約 24 m, 適正分担比は 20% となる。皆伐地ではその平均木寄せ距離は約 20 m となり、適正分担比は約 30% となる。

以上のとおり、急斜~急峻地 (33% 以上) に適する集材路網として、幹線作業路を併設する場合の路網型について究明したが、各種集材現場ごとの $Z_1 \sim Z_3$ の評価値が与えられることによって、トラクタ集材作業をより効果的に実行するための木寄せ距離や幹線作業路と作業路の分担比が表 31 および表 32 から予測することが可能となり、急傾斜地に対するトラクタ集材路網計画を立てる際の指針を与えることが可能となった。

第 4 節 集材現場におけるトラクタ集材路網配置計画 (適用例)

これまで論じてきた内容を実際の現場に適用し、トラクタ集材路網の配置計画の実用面での検討を行った。

適用対象地は、天然林施業地を対象に、北

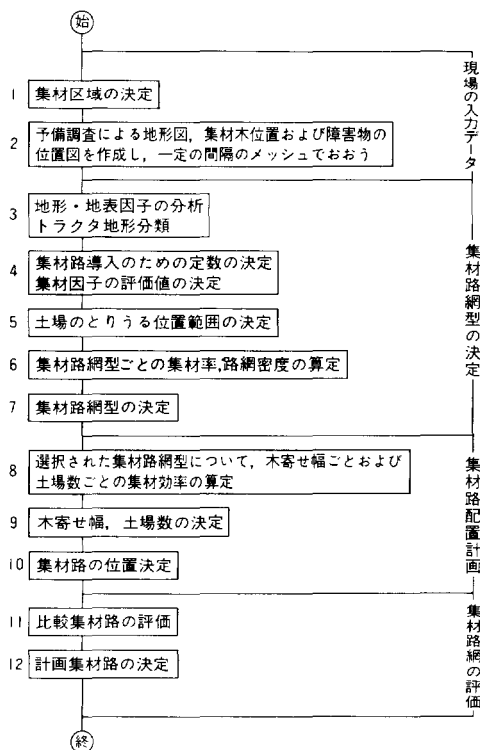


図 81. トラクタ集材路網計画のフローチャート

海道営林局下川営林署管内（奥サンル 57 林班），東大北海道演習林内（西達布 46 林班）および長野営林局伊那営林署管内（小黒川 237 林班）から実際の作業現場を選定し，現場入力データを使ってそれぞれの集材路網計画のステップの作業と評価を行った。

集材路網計画は大きく分けると，段階ごとに集材路網型の決定，集材路網配置計画および集材路網選定の評価からなり，それらの内容を総合的に示すと図 81 のとおりである。具体的な集材路網導入計画の手順は図 82 のようなステップにしたがって実施した。以下，各ステップについて，その概要を説明する。

(1) ステップ 1. 現場入力データの収集

トラクタ集材作業の対象となる区域の作業条件などの現況の把握は，図 82 に掲げるような内容について調査し，現場入力データを集める。

これらのデータの収集は，森林調査簿，収穫調査資料，作業図などの既存資料によって実施することが多いが，必要に応じて現地調査や聞き取り調査を行い，現況把握の精度を高める必要がある。現場入力データは大別すると，「林地条件」「集材条件」「その他の条件」に分けられる。林地条件は「集材路網型の決定（ステップ 2）」，集材条件とその他の条件は「適正な土場位置と土場数の決定（ステップ 3）」に主として使用されるが，これらの条件因子は「集材路網の配置の算定（ステップ 4）」でふたたび使用される。なお，これらの因子は最終的なものではなく今後の研究を待つてより精度の高いものにしていく必要がある。

表 33 は適用対象地の現場入力データを示したものである。また図 83～図 85 はそれぞれ適用対

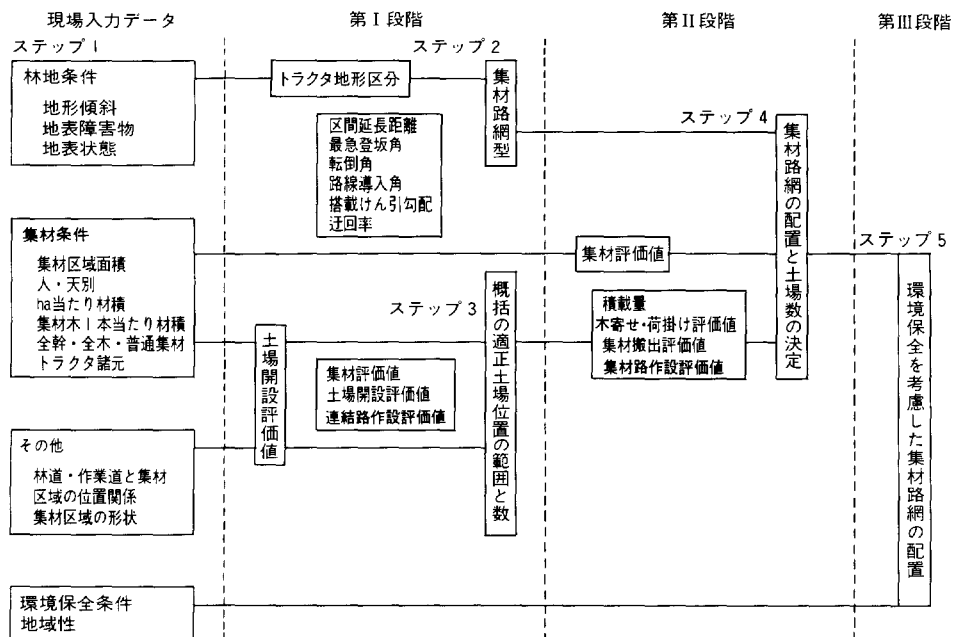


図 82. 具体的な現場入力データによる集材路網配置計画の算定過程

表 33. 現場入力データ

入力データ		下川宮林署管内	東大北海道演習林	伊那宮林署管内
集材 材 関 連 条 件	集材伐区面積 (ha)	3.04 天然林	3.34 天然林	2.20 天然林
	林相・伐採方法	(皆・択伐)	(択伐)	(漸伐)
	集材方法	全幹	普通	全幹
	集材材積 (ha 当たり)	31.4 m ³ /ha	44.7 m ³ /ha	154.2 m ³ /ha
	集材木 1 本当たり材積	1.4 m ³	1.8 m ³	0.85 m ³
	伐採本数	68 本	83 本	399 本
	立木本数	387 本	1935 本	574 本
	トラクタ諸元	クローラ (7 t) ホイール (7 t)	クローラ (7 t)	クローラ (7 t)
林地 関 連 条 件	地形傾斜 (%)	20.3% (11.5°)	29.6% (16.5°)	34.9% (19.2°)
	地表障害物	$\lambda=0.034$ $\bar{x}=0.7$ ランダム	$\lambda=0.106$ $\bar{x}=0.6$ ランダム	$\lambda=0.072$ $\bar{x}=0.45$ ランダム
	地表状態	腐植土 $\mu=0.40$	砂質壤土 $\mu=0.50$	褐色森林土 $\mu=0.55$
そ の 他	林道・作業道から集材 区域までの距離	359.3m	250.0m	隣接
	格子網間隔	10m × 10m	10m × 10m	10m × 10m

象地の地形図, 集材木分布図および立木分布図を示したものである。

(2) ステップ 2. 集材路網型の決定

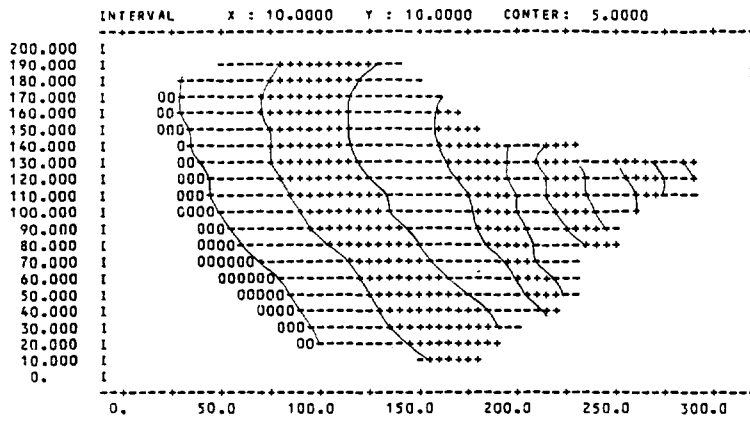
地形傾斜, 地表障害物および地表状態に関するデータを使ったトラクタ集材のための地形区分によってトラクタ集材路網型が変化する。そこで, このステップでは次のような手順で作業を行う。

- ① 地形傾斜, 地表障害物, 地表状態に関するデータを使用してトラクタ集材地形指数による地形区分を行う。トラクタ地形区分は第 1 報の図 30 のとおりである。
- ② 地形区分の結果, 次のような集材路網型のための条件因子が得られる。これらの因子は「集材路網の配置の算定 (ステップ 4)」でふたたび使用される。
 1. 最急登坂角。
 2. 転倒角。
 3. 最大区間延長距離。
 4. 路線導入角。
 5. 搭載けん引勾配。
 6. 迂回率。
- ③ 地形傾斜区分によってトラクタ集材路網型を決定する。地形傾斜区分と集材路網型との対応は表 28 に示したとおりである。すでに述べたように集材路網型は, 図 39 に示した 6 種類に分けられる。また集材搬出方式も組み合わせられる (図 40)。

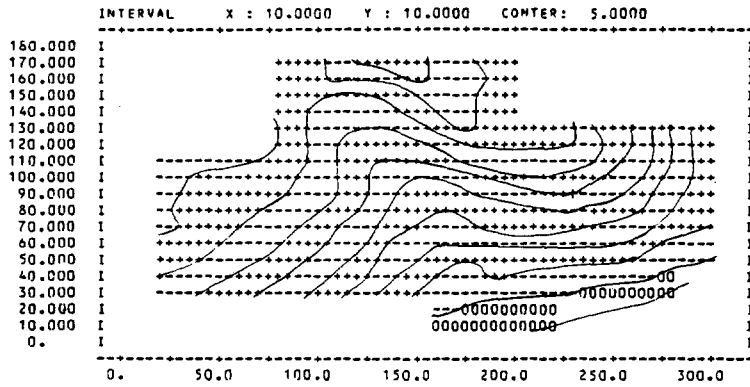
(3) ステップ 3. 概括的な適正土場位置と土場数の決定

現場入力データで集材条件とした集材面積, 人・天別, ha 当たり材積, 集材木 1 本当たり材積,

下川営林署管内



東大北海道演習林



伊那営林署管内

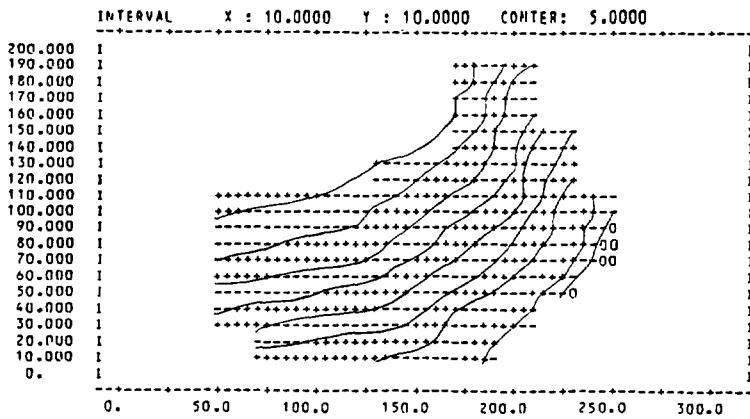
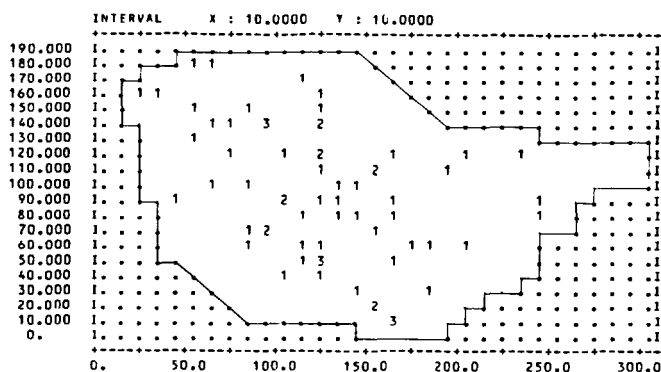
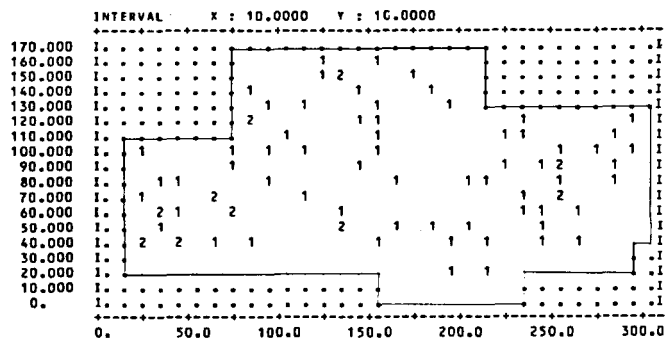


図 83. 適用対象地の地形図

下川営林署管内



東大北海道演習林



伊那営林署管内

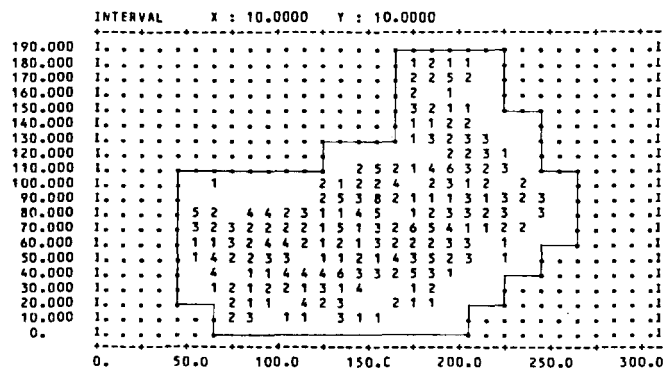
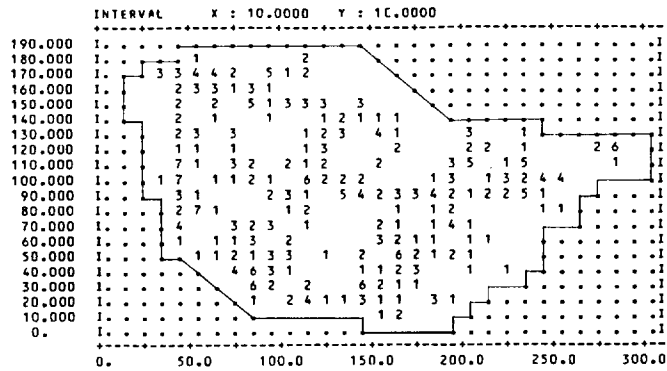
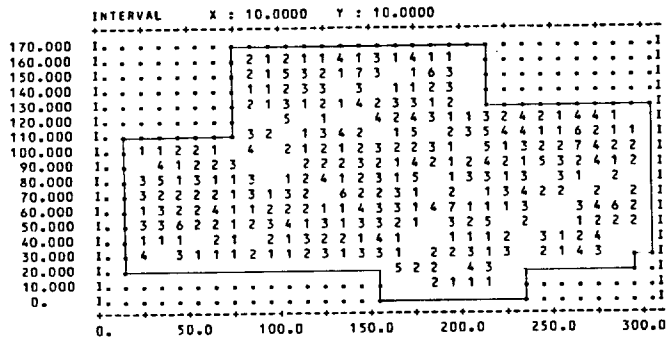


図 84. 適用対象地の集材木の分布図

下川営林署管内



東大北海道演習林



伊那営林署管内

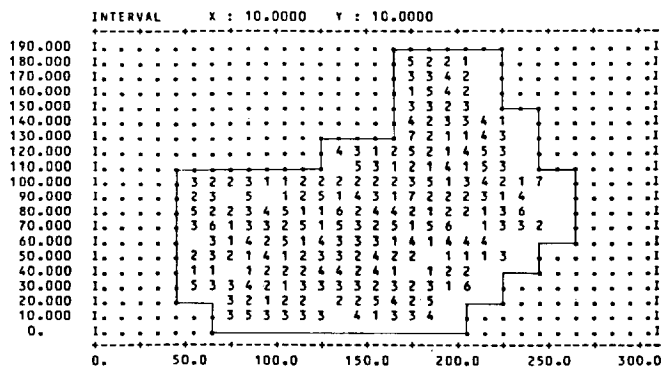


図 85. 適用対象地の立木の分布図

トラクタ諸元や林道・作業道と集材区域の位置関係のわかる作業図を使って「土場の位置」をどの範囲にし、「土場数」をいくつにするかを具体的に検討する。この段階では土場位置の範囲および土場数は、適正と思われるある程度の目安が得られれば十分である。土場の位置や土場数の問題は、事業形態や規模（トラクタ台数、土場作業機械の有無、伐出工程の違いなど）による直接的な影響ばかりでなく、ほかの条件、例えば隣接伐区などの関係あるいは環境保全などへの配慮等によって変化することが考えられるので、とりあえずは、種々のデータを使って経験的に検討することにする。なお、土場の位置や土場数を決定する際の評価値として、1. 集材作業工期、2. 土場開設人工数、3. 林道・作業道と対象伐区の位置関係、4. 伐区形状などが考えられる。1土場当たりの平均的な適正伐区面積は表24に示したとおりである。

ステップ2および3に対して適用対象地の集材路導入のための条件因子および評価値は表34のとおりである。

(4) ステップ4. 集材路網の配置の算定

ステップ2で集材路網型が決まり、ステップ3で適正な土場位置の範囲と土場数についてのおおよその検討がつけられた。このステップでは決定された路網型や土場位置の範囲・数にしたがって、集材路網をどのように配置するかを検討する。「適正な集材路網の配置」を明らかにするため、「集材効率を最大」にすることを考える。ここでは、集材に要する人工数を最小にする値を以って集材効率最大とし、そのときの集材路網配置を最適解と考える。

表34. 集材路網導入のための条件と評価値

規定数		下川宮林署管内	東大北海道演習林	伊那宮林署管内
地形区分	地形傾斜区分 トラクタ地形区分	緩～中斜地 Ⅲ	中斜地 Ⅴ	急斜地 Ⅴ～Ⅵ
集材路網導入関連	最急登坂角条件（度）	23°以下	25°以下	25°以下
	転倒角条件（度）	13.8°以下	15°以下	15°以下
	最大区間延長距離（m）	50 m以下	50 m以下	50 m以下
	集材路の導入角（度）	40°以下	90°以下	60°以下
	搭載けん引勾配（%）	-10% 以上	-15% 以上	-15% 以上
	通行不能最大障害物頻度	0.15	0.15	0.15
	迂回率	0.23	0.32	0.37
集材作業関連	積 載 量	4 m ³	4 m ³	4 m ³
	木寄せ・荷掛け人工評価値 （人工数 / m ³ ・m）	0.2174 E-2	0.1784 E-2	0.2853 E-2
	集材搬出人工評価値 （人工数 / m ³ ・m）	0.1813 E-3	0.1528 E-3	0.2294 E-3
	集材路作設・補修評価値 （人工数 / m）	0.01786 作業路 0.00446 （作業路）	0.01905 作業路 0.00476 （作業路）	0.02759 作業路 0.01301 （作業路）
その他	土場適用箇所と数	1	1	2

注）トラクタ地形区分、迂回率の算定は第1報に示した方法を適用した

集材路網の配置の算定のためには、ステップ1で収集された林地条件、集材条件、その他の条件などの現場入力データのほかに、集材評価値として次のような因子についてもデータが必要である。

1. トラクタ積載量。
2. 木寄せ・荷掛け作業工期。
3. 集材搬出作業工期。
4. 集材路作設人工数。

表 35. 適用対象地の最適集材路網の算定結果

	木寄せ幅 (m)	集材路 密度 (m / ha)	トラクタ総走行距離(m)		集材率 (%)	残存立木 被害率 (%)	集材所要 人工数	集材効率 (m³/人工)
			L ₁	L ₂				
東 大 北 海 道 演 習 林	10	320.7	14852.4	12255.3	96.39	9.6	11.593 (10.799)	12.421 (13.335)
	20	215.1	12553.0	10709.6	100.0	9.8	9.922 (9.359)	15.057 (15.963)
	30	172.8	8432.4	7724.4	100.0	11.2	9.324 (9.108)	16.023 (16.403)
	40	126.2	7353.0	6837.4	100.0	13.6	9.586 (9.429)	15.585 (15.845)
	50	99.5	7563.0	6829.7	100.0	15.0	10.557 (10.333)	14.152 (14.459)
	60	87.8	6264.4	5738.8	100.0	17.0	11.306 (11.146)	13.214 (13.404)
	70	71.9	6064.4	5365.6	100.0	18.5	12.325 (12.112)	12.122 (12.335)
	*32.5	143.8	8336.8	7602.4	100.0	11.8	9.167 (8.942)	16.298 (16.708)
下 川 宮 林 署 管 内	10	270.0	8146.6	6482.1	100.0	7.7	11.077 (10.473)	8.612 (9.109)
	20	181.6	4130.8	5527.4	100.0	6.8	10.469 (9.962)	9.113 (9.576)
	30	135.6	3459.2	4374.0	100.0	7.6	10.287 (9.955)	9.274 (9.583)
	40	101.9	3098.2	3979.8	100.0	8.3	10.709 (10.389)	8.908 (9.183)
	50	75.7	2538.4	3352.1	100.0	9.1	11.137 (10.841)	8.566 (8.800)
	60	56.4	1803.8	2545.6	100.0	10.6	11.591 (11.322)	8.231 (8.426)
	70	49.0	1575.2	2316.2	100.0	11.9	12.442 (12.173)	7.668 (7.837)
	*27.5	146.0	5395.8	4470.5	100.0	6.9	10.209 (9.873)	9.345 (9.663)

注1) () は併用集材走行方式の場合。L₁: 往復とも集材路上, L₂: 復路は直接土場。

注2) * は最小集材所要人工数を与える場合の諸結果。

注3) 東大北海道演習林: 集材面積 3.34ha, 集材材積 149.4 m³, 既設幹線作業路 0m。

下川宮林署管内: 集材面積 3.04ha, 集材材積 95.4 m³, 既設幹線作業路 191.7m。

表35-2. 適用対象地の最適集材路網の算定結果

	最大集材幅 (幹線作業路密度) R	木寄せ幅 R	作業路密度 (m / ha)	トラクタ総走行距離(m)		集材率 (%)	残存立木 被害率 (%)	集材所要 人工数	集材効率 (m ³ / ha)
				幹線路走行	作業路走行				
伊那営林署管内	40 (133.3)	10	266.8	3291.8 (136)	9442.0	95.24	19.6	26.613	12.744
		20	124.0	4419.6 (278)	4951.6	100.00	19.5	24.589	13.643
		30	29.1	5834.5 (367)	1379.8	100.00	20.6	26.596	12.752
		40	0.0	6343.3 (399)	0.0	100.00	29.7	30.310	11.189
	50 (100.3)	10	305.5	2165.0 (107)	9983.2	94.99	17.9	25.305	13.402
		20	195.0	2639.3 (218)	5946.4	100.00	19.0	24.075	14.087
		30	50.8	3874.2 (320)	2653.2	100.00	20.0	24.759	13.698
		40	18.2	4564.3 (377)	664.4	100.00	23.3	28.230	12.014
		50	0.0	4830.7 (399)	0.0	100.00	33.1	32.491	10.438
	60 (66.6)	10	329.4	1329.8 (67)	10433.2	93.98	15.4	24.984	13.575
		20	180.0	1545.4 (175)	8370.2	100.00	18.5	22.321	15.194
		30	84.2	2331.3 (264)	5514.4	100.00	17.9	24.002	14.130
		40	45.7	2975.9 (337)	2660.4	100.00	20.3	27.008	12.557
		50	18.2	3346.8 (379)	935.8	100.00	26.6	30.572	11.093
		60	0.0	3523.5 (399)	0.0	100.00	36.9	34.617	9.797
	70 (59.3)	10	343.6	1220.0 (76)	9976.2	93.98	16.7	24.040	14.108
		20	196.7	1363.2 (163)	8192.6	100.00	19.5	22.102	15.345
		30	87.8	2040.5 (244)	6044.4	100.00	18.4	23.795	14.253
		40	49.2	2626.0 (314)	2753.6	100.00	20.2	26.475	12.810
		50	32.9	3035.7 (363)	1228.2	100.00	23.6	30.440	11.142
		60	15.5	3286.6 (393)	434.2	100.00	31.9	34.508	9.828
		70	0.0	3336.8 (399)	0.0	100.00	43.1	38.931	8.712

	最大集材幅 (幹線作業路密度) $\bar{R}$	木寄せ幅 R	作業路密度 (m/ha)	トラクタ総走行距離 (m)		集材率 (%)	残存立木 被害率 (%)	集材所要 人工数	集材効率 (m^3/ha)
				幹線路集材	作業路集材				
伊那 宮林 署管内	80 (50.5)	10	347.2	806.0 (62)	10579.4	93.98	17.0	23.177	14.633
		20	203.4	844.6 (143)	9314.8	100.00	20.3	22.015	15.405
		30	106.4	1287.5 (218)	6599.2	100.00	19.8	23.590	14.377
		40	64.2	1695.0 (287)	3648.4	100.00	20.4	26.260	12.915
		50	43.2	1960.8 (332)	1940.2	100.00	23.3	30.024	11.296
		60	20.0	2208.9 (374)	782.0	100.00	28.4	33.864	10.015
		70	11.0	2315.2 (392)	274.0	100.00	37.3	38.344	8.845
	90 (45.5)	10	355.8	760.0 (63)	12042.6	92.73	18.2	25.321	13.394
		20	226.1	772.9 (134)	13651.4	100.00	20.8	24.152	14.042
		30	107.8	1165.1 (202)	6836.0	100.00	20.1	23.345	14.528
		40	67.4	1563.1 (271)	3448.6	100.00	20.7	25.923	13.083
		50	51.1	1805.3 (313)	2069.6	100.00	22.0	29.812	11.376
		60	30.2	2001.4 (347)	1190.4	100.00	27.7	33.745	10.050
		70	20.0	2220.6 (385)	328.2	100.00	33.9	38.170	8.885
	100 (36.4)	10	362.9	580.0 (55)	13053.0	91.24	18.7	26.890	12.612
		20	260.8	597.3 (126)	15943.6	100.00	23.4	25.322	13.393
		30	126.9	872.2 (184)	9900.0	100.00	22.5	24.535	13.823
		40	77.0	1194.6 (252)	4042.0	100.00	21.5	25.727	13.183
		50	57.2	1403.2 (296)	2169.8	100.00	22.6	29.273	11.586
		60	32.9	1592.8 (336)	1318.4	100.00	26.0	33.278	10.191
		70	27.3	1697.1 (358)	821.2	100.00	31.4	37.784	8.976
	* 80	19	209.7	806.0 (130)	9602.2	100.00	22.4	21.770	15.579

注 1) 幹線路走行の () は作業道上の総走行距離。

注 2) * は最小集材所要人工数を与える場合の諸結果。

注 3) 伊那宮林署管内：集材面積 2.20ha，集材材積 339.2 m^3 ，既設作業道 177.1 m 。

ただし、1～4のデータについては、平均的な基準値を作成しているので（表11、表22）、それぞれの現場で新たに作る必要はない。

集材路網配置の最適解を求めるのは、各集材現場の諸条件、諸評価値を使い、電算機によるシミュレーション（繰り返し演算）による。最適解の検討も最終的には簡易なパソコンなどを使って現場で簡単に行うようにすべきであるが、現段階では大型計算機が必要である。

このようにして、集材効率を最大にする「最適集材路網」が選定されるが、最適解として提示される内容は次のとおりである。

1. トラクタ集材路網の型……ステップ2
2. 最適平均木寄せ距離

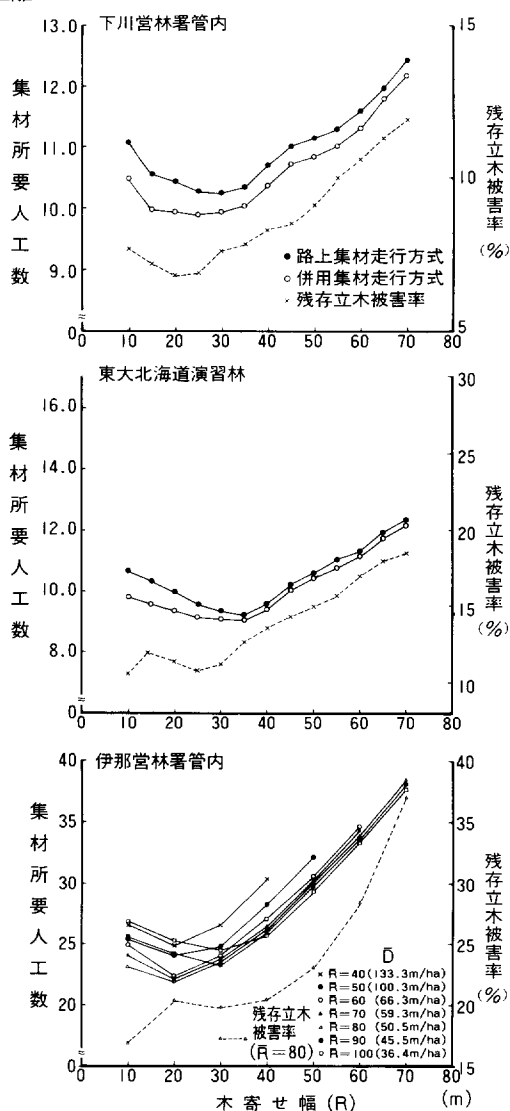


図 86. 比較集材路網の木寄せ幅と評価値

3. 最適集材路網密度
 4. 最適土場位置
 5. 最適土場数
- } ……ステップ3よりさらに最適なものを求める。
6. 幹線作業路の適正分担比 $\left(= \frac{\text{幹線作業路延長}}{\text{全集材路網延長}} \right)$
 7. トラクタ集材路網導入計画図

表35は適用対象地について計算の結果を示したものであり、図86は最小集材所要人工数を与える木寄せ幅を示したものである。その結果、適用対象地の最適集材路網の最適解は表36のとおりである。また各適用地の集材路網導入計画図は図87に示すとおりである。

(5) ステップ5. 環境保全などを考慮した集材路網の配置の評価

適正なトラクタ集材路網を選定するために直接的な経済性あるいは集材効率の観点から検討を進めてきたが、作業対象地域によっては環境保全への配慮が特に要求される場合がある。環境保全の要求は、非皆伐施業林における残存立木の損傷や林床の攪乱など狭義の林地環境の保全のほかに、動・植物の生態系の保護や水源の涵養、国土の保全、景観の維持などのための森林の公益性に対する保全が含まれているが、ここではきわめて狭義に解して、1例として残存立木の被害率による集材路網密度や配置の補正を例示するにとどめる。

残存立木の被害率による集材路網密度の補正は、ステップ1において現場入力データとして与えられた残存立木の密度や配置図などを使って、各集材路網の被害率を予測する。被害率の算定のための評価値は既往の文献^{67)~69)}から得たものである。以上の結果、図86の破線で示すように残存立木の被害を最小にする木寄せ幅が算定される。表36の下段は、残存立木の被害を考慮した場合の最適集材路網について示したものである。表から、下川宮林署管内の適用地の場合は、最適集材路網型は樹枝型路網となり、集材率100%の場合の残存立木の被害率を考慮した場合の最適な平均木寄せ距離は約12.5m、集材路網密度は156.3m/haとなる。また土場数は1箇所となる。同様

表36. 最適集材路網計画の適用結果

評価対象	適用対象地	下川宮林署管内	東大北海道演習林	伊那宮林署管内
集材効率を最も高める	集材路網型	樹枝型路網	樹枝型路網	幹線樹枝型路網
	平均木寄せ距離 (m)	13.75	16.25	9.5
	集材路網密度 (m / ha)	146.0	143.8	340.7 (131.0)*
	幹線作業路の分担比	0	0	0.385
	土 場 数	1	1	2
残存立木の被害を考慮した集材路網	集材路網型	樹枝型路網	樹枝型路網	幹線樹枝型路網
	平均木寄せ距離 (m)	12.5	13.75	15.0
	集材路網密度 (m / ha)	156.3	178.4	231.3 (147.1)*
	幹線作業路の分担比	0	0	0.636
	土 場 数	1	1	2

注) * 幹線作業密度 (作業道を含む) (作業道密度 80.5 m/ha)

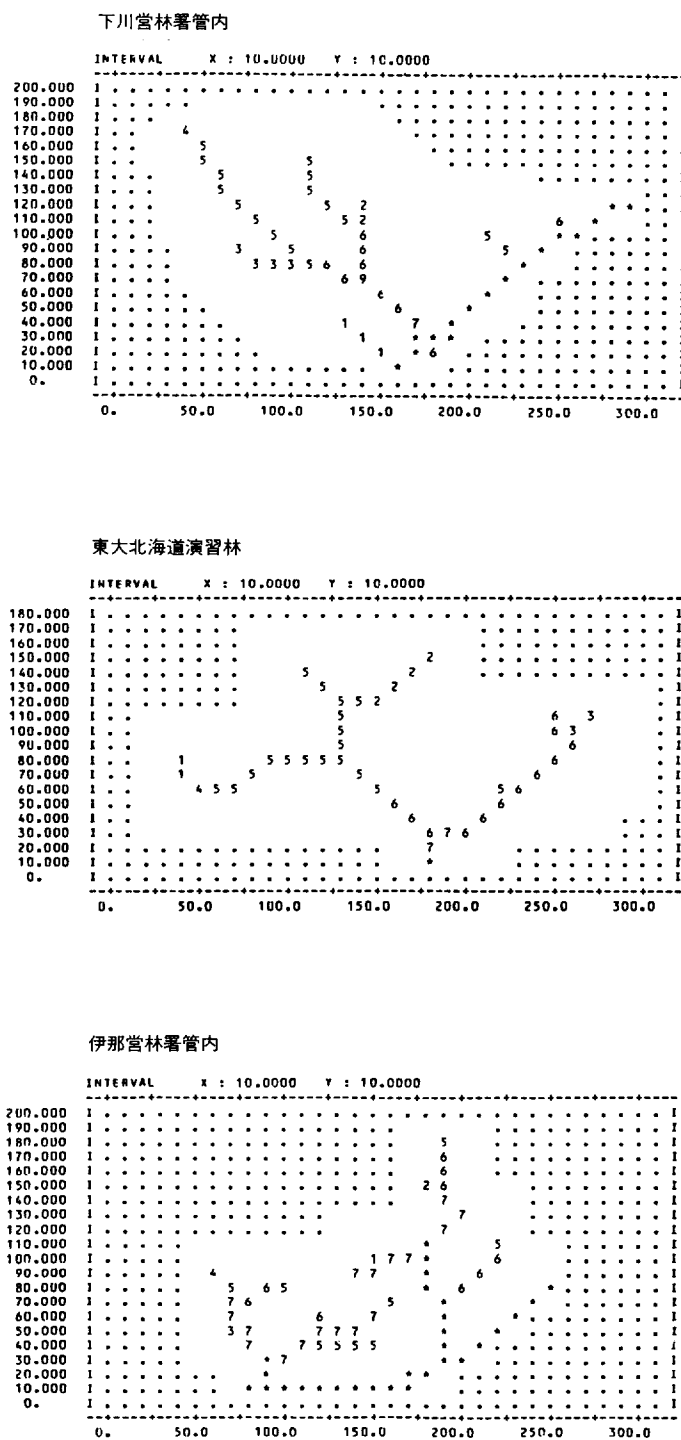


図 87. 集材効率を最大にするトラクタ集材路網導入図

に東大北海道演習林の適用地の場合は、最適集材路網型は樹枝型路網となり、集材率 100% の場合の残存立木の被害率を考慮した場合の最適な平均木寄せ距離は 13.75 m、集材路網密度は 178.4 m/ha となる。土場数は同様に 1 個所となる。また伊那営林署管内の適用地の場合は、最適集材路網型は幹線樹枝型路網となり、集材率 100% の場合の残存立木の被害率を最小にする集材路網は、幹線作業路を 66.6 m/ha 並設した場合であり、平均木寄せ距離を 15 m とした場合である。つまり、作業路密度は 84.2 m/ha となり、既設の作業道を含め幹線作業路の適正分担比は 63.6% となる。また土場数は 2 個所となる。

図 88～図 90 は各適用対象地についてそれぞれ集材効率を最大にする集材路網配置結果と残存立木の被害率を考慮した場合の最適集材路網配置結果を示したものである。図から残存立木の被害率

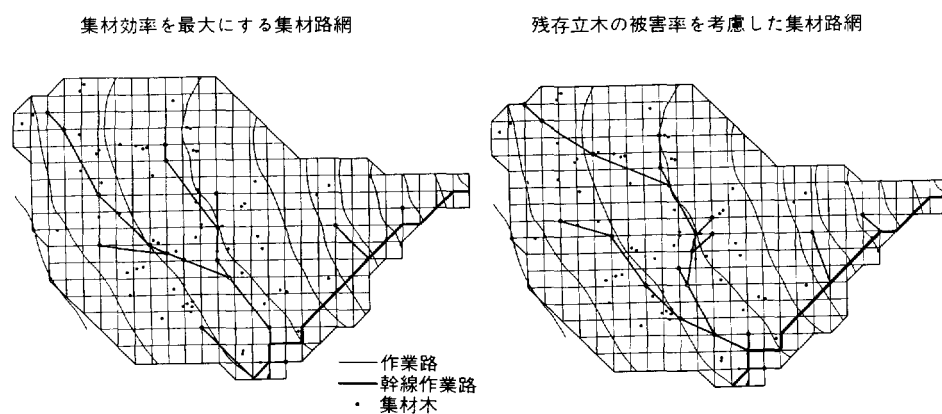


図 88. 集材効率を最大とする集材路網および残存立木の被害率を考慮した場合の集材路網の配置結果（下川営林署管内）

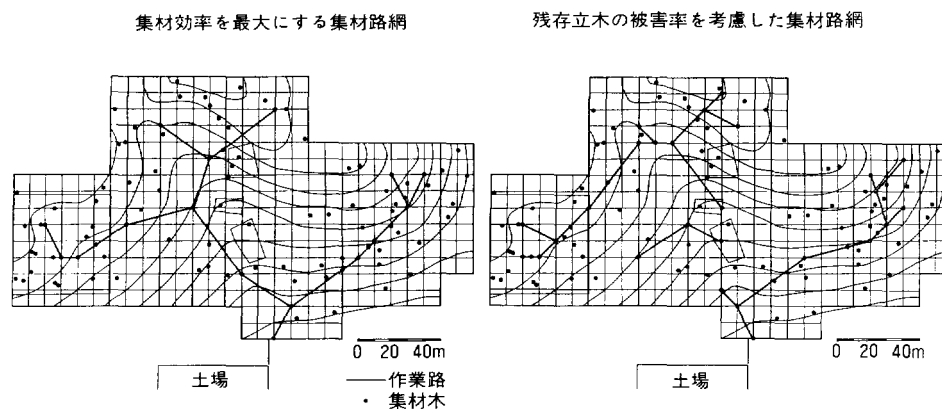


図 89. 集材効率を最大とする集材路網および残存立木の被害率を考慮した場合の集材路網の配置結果（東大北海道演習林）

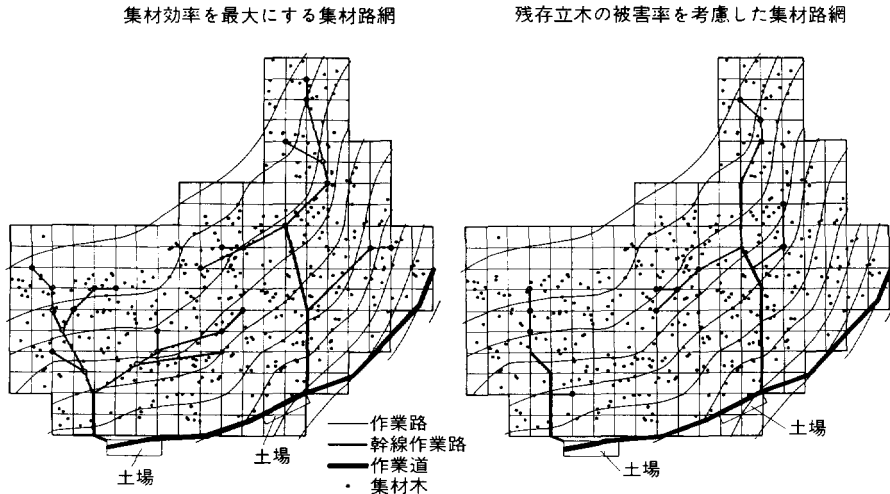


図 90. 集材効率を最大とする集材路網および残存立木の被害率を考慮した場合の集材路網の配置結果（伊那営林署管内）

を考慮した場合の集材路網は集材効率を最大にする場合の集材路網に比べて地形が緩～中斜地の下川営林署内の適用地や東大北海道演習林内の適用地では、集材路網密度は大きくなり、ウインチによる木寄せ距離は短くなる。しかし急傾斜地の伊那営林署内の適用地では幹線作業路の導入延長は大きくなるが、作業路密度は小さくなり、全体の集材路網密度は小さくなる。したがって木寄せ距離は大きくなる。しかしながら各適用地とも、集材効率を最大とした場合と残存立木の被害を考慮した場合の集材路網密度と木寄せ幅の関係は、それほど違いなく、集材路の導入ルートも細部は異なるにしてもほぼ同一の方向ないし地点に向って集材路は導入される結果となっている。

以上当該適用地では、トラクタ集材路網の配置はほぼ集材効率を最大にする路網配置で与えられることになるが、残存立木の被害に対する評価だけをとってみても、集材路網配置は多少違ってることから、実際に現場に適用する場合は、それぞれの現場の方針や目的に応じて評価対象を取り上げ、それぞれの評価対象について同様の路網配置計画を行い、いくつかの比較路網からその現場の目的に合った路網を選択することが必要となる。そうすれば、経験や勘に比べて合理的かつ客観的なトラクタ集材路網の導入が可能となる。

第V章 要 約

本研究はトラクタ集材作業計画にかかわる問題として、各種のトラクタ現場に対して技術的かつ経済的に妥当な集材方法を確立しようとする場合にその鍵となるトラクタ集材路網の配置計画を明らかにすることを目的としている。そのためには、まずトラクタ集材現場の林地条件を定量的に把握する必要がある、各集材現場に対し統一性のある機能的分類表示法について第1報で明らかにした。本報ではこれに関連してトラクタ集材を導入する立場から、トラクタ集材工程の把握やトラクタ集材路網の選択などトラクタ集材計画に必要な基礎資料を得るために、林地条件と集材工程ある

いは林地条件と集材路網パターンの関係について統計的あるいは理論的に解析を行い、これらの諸関係を基にトラクタ集材路網計画法について考究した。

第Ⅱ章では、トラクタ集材路網の幾何学的な特徴について理論的に究明するとともに、実際のトラクタ集材現場から得られたデータを基にし分析を行い、トラクタ集材工期および集材路網に関する諸評価値について検討した。第Ⅲ章では、これらの諸評価値および諸関係を基に、各種のトラクタ集材地に対して最適なトラクタ集材方法について明らかにした。さらに第Ⅳ章では急傾斜地（33%以上）におけるトラクタ集材路網型として、幹線作業路を配設する場合の集材路網型について検討し、幹線作業路と作業路の合理的分担および最適な木寄せ距離について明らかにした。最後に、本論文の適用例として、実際の集材現場を対象にトラクタ集材路網計画の流れにしたがい、具体的な配置計画を行い、評価検討を行った。

結果について要約すると次のとおりである。

(1) トラクタ集材路網の特徴を把握する方法として、集材区域に対する集材路網の配置の偏りを表す指標（f 値）と集材路網の形態の違いを示す指標（p 値）を提示し、各種トラクタ集材路網の分類を明らかにした。トラクタ集材路網の f 値のとりうる範囲は $0.74 \sim 8/3$ となり、p 値は $0 \sim 1$ となるが、一般的なトラクタ集材路網（ランダムな配置、樹枝状の形態の路網）では、f 値は $\frac{\pi}{2}$ 、p 値は $2/3$ となることがわかった。

(2) トラクタ集材路網の林地導入に関し、想定モデルを適用して、地形傾斜とトラクタ集材路網密度、木寄せ幅および集材率の関係について明らかにした（図 54）。その結果、地形傾斜が急になると、トラクタ集材路網密度は小さくなり、集材率を確保するためには、木寄せ幅を大きくしなければならないこと、急傾斜地の場合、集材率を確保するための必要な木寄せ幅を最小にする集材路網型は、幹線作業路を並設した路網型となり、放射型路網が最も大きい木寄せ幅を必要とすることなどがわかった。また、平坦～緩斜地では、各集材路網型とも木寄せ幅が小さい場合でも集材率を確保することができたが、その集材路網の配置指標（f 値）は、樹枝型路網が最も小さく均一的な配置となり、放射型路網が最も大きいランダムな配置を示した。しかし、各集材路網型とも、その f 値は $1 \sim \frac{\pi}{2}$ の範囲であることがわかった。

(3) トラクタ集材地形区分に対して、最適なトラクタ集材路網型、および集材搬出方式について明らかにした。また同時に、平均的な択伐地（集材量 $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ ）と皆伐地（集材量 $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ ）に対し、最適な平均木寄せ距離と土場数について明らかにした。これらの結果は表 28 のとおりである。

(4) 急傾斜地に適用される集材路網型として幹線作業路を配設した場合の路網型について地形傾斜、幹線作業路密度、作業路、木寄せ幅、および集材率の関係を明らかにした（図 73）。その結果、地形傾斜ごとに一定の集材率を確保するための必要幹線作業路密度、および木寄せ幅の関係を求めることができた（図 74）。また、最小集材所要人工数を与える最適木寄せ距離、幹線作業路密度と作業路密度の適正分担比について明らかにした。これらの結果は表 31、表 32 のとおりである。

(5) 本研究で得られた成果に基づいて、実際の集材現場を対象にトラクタ集材路網の配置計画を

行った。その結果、トラクタ集材作業地に対して各種の集材路網配置を相対的に評価することが可能となり、トラクタ集材路網型、集材路網の配置、導入順序、集材路の等級の配分決定などに対して客観的な評価が得られることが明らかとなった。さらに、適切な集材路網の選定を行うために環境保全面から残存立木の被害を最小にする比較路網を算定し、集材効率を最大にする集材路網との相対的な評価を行うことにより、集材路網の細部の配置について評価が可能となった。

以上が本論文の要旨であるが、ここで得られた成果により、トラクタ集材路網計画において意図する最適集材路網密度や配置、導入順序あるいは集材路の等級の決定といった問題は、ここで用いた電算プログラムにより客観的に求めることが可能となり、ここで得られた結果は従来の経験則に比べ合理的かつ客観的なものであることが明らかとなった。

謝 辞

本研究をまとめるに当たり、長期にわたる懇篤なるご指導と暖かい励ましを賜わり、さらに校閲の労をとられた東京大学農学部上飯坂実教授に対して深い感謝と敬意の念を捧げます。

また、終始有益なご指導を賜わり、校閲の労をとられた東京大学農学部南方康助教授および宇都宮大学農学部村山茂明教授に対し感謝の意を表します。

そして、有益な助言と激励をいただいた元林業試験場機械化部山脇三平部長、林業試験場機械化部福田光正部長ならびに岩手大学農学部大河原昭二教授に対し感謝の意を表します。

さらに、本研究のための試験・実験に当って東京大学農学部北海道演習林および各営林局署より多大な便宜を計っていただいた。また長年にわたって、いつも支援して下さった林業試験場機械化部小沼順一ならびに奥田吉春両科長をはじめとする機械化部の方々に、心から御礼申し上げます。

引 用 文 献

- 1) MATTHEWS, D.M.: Cost control in the logging industry. McGraw-hill, New York, 374 pp., (1942)
- 2) KATO, S.: Studies on the forest road system -Preliminary report on the road density-. Bulletin of the Tokyo U. Forests, 63, 215~232, (1967)
- 3) 春永剛聖: 林内路網密度に関する 2, 3 の考察. 林道, 20, No. 142, 2, 27~32, (1983)
- 4) PESTAL, E.: Kardinal Punkt 500 m !. Rückungsmethade entscheiden Wegnetzdicke. Holz-Kurier, Nr. 51/52, Wien, (1963) (加藤誠平 訳: 林道密度は集材法によってきまる—500 m 間隔の林道網—. 森林利用研究会資料 58, 9 pp. (1964))
- 5) HAFNER, F.: Zur forstlichen wegenetzlegurg in steilen gebirgsgelände. Allgemeine Forstzeitung. 75 Jahrgang folge 3/4, (1964)
- 6) LARSSON, G.: Studies on forest road planning. Transactions of the Royal Inst. of Technology, 147, 8~40, (1959)
- 7) SUNDBERG, U.: Studier i skogsbrukets transporter. Forskningsstiftelsen SDA : s medd. nr. 48, 2 uppl. (1960)
- 8) SAMSET, I.: The forest terrain in Norway. Report on Forest Operation Res. 8, Norwegian Forest Res. Inst., 51~52, (1967)
- 9) PETERS, P.A.: Spacing of roads and landing to minimize timber harvest cost.

- Forest Science, **24**, 2, 209~217, (1978)
- 10) MARSHALL, D.A. *et al.*: Remote sensing modifications for optimized logging road networks. Transaction of the ASAE, 1044~1046, (1973)
 - 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) 上飯坂実: 森林利用学序説. 地球出版, 東京, 234 pp., (1971)
 - 13) KAMIZAKA, M.: Studies on optimum density of forest road (1)-Concerning standard models-. J. Jap. For. Soc., **45**, 9, 289~292, (1963)
 - 14) KAMIZAKA, M.: Studies on optimum density of forest road (2)-On development road density-. J. Jap. For. Soc., **48**, 2, 48~54, (1966)
 - 15) 南方 康: 素材生産地域における適正林道密度ならびに限界林道密度について. 東大演習林報告, **61**, 1~36, (1965)
 - 16) 南方 康: 林道網に関する研究. 東大演習林報告, **64**, 1~58, (1968)
 - 17) 南方 康: 林内における基礎路網密度. 日林誌, **59**, 8, 298~300, (1977)
 - 18) 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**, 1~101, (1983)
 - 19) 南方 康 外: 複合的路網の整備目標. 東大演習林報告, **74**, 81~96, (1985)
 - 20) SAMSET, I.: Influence of the Development of Mechanization on Silviculture. Proc. Fifth World Forestry Congress, **3**, USA, (1960)
 - 21) ABEGG, B.: Die schätzung der optimalen dichte von waldstraßen in traktorbefahrbaren gelände. Swiss Federal Inst. of Forestry, Birmensdorf, **54**, 2, 101~213, (1978)
 - 22) STAAF, K.A.G. *et al.*: Tree harvesting techniques. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 371 pp., (1984)
 - 23) 大河原昭二: 帯広営林局管内における集材距離とトラック作業道の合理的関連性に関する研究 (I) —数学モデルの前提条件—. 日林誌, **46**, 7, 231~236, (1964)
 - 24) 大河原昭二: 帯広営林局管内における集材距離とトラック作業道の合理的関連性に関する研究 (II) —矩形平地林における数学モデル—. 日林誌, **46**, 7, 269~273, (1964)
 - 25) 大河原昭二: 帯広営林局管内における集材距離とトラック作業道の合理的関連性に関する研究 (III) —地形上の制約をうける場合の計画法—. 日林誌, **46**, 9, 311~316, (1964)
 - 26) 大河原昭二: 帯広営林局管内における集材距離とトラック作業道の合理的関連性に関する研究 (IV) —本計画の適用例—. 日林誌, **47**, 1, 225~230, (1964)
 - 27) 青木信三: 高密路網営林法. 日本林道協会, 東京, 143 pp., (1970)
 - 28) 平賀昌彦: 電算法による林道網計画法に関する研究 (I) —作業道の最適選定と密度決定の方法—. 林試研報, **238**, 1~30, (1971)
 - 29) 平賀昌彦: 電算法による林道網計画法に関する研究 (II) —簡単な伐区形状パターンによる集材作業道網決定の方法—. 林試研報, **245**, 99~158, (1972)
 - 30) 農林水産省統計情報部農林統計課監修: 林業調査報告書—総合編—. 農林統計協会, 375 pp., (1983)
 - 31) 林業機械化協会編: 林業機械便覧. 林業機械化協会, 262 pp., (1986)
 - 32) GHOSH, B.: Random distances within a rectangle and between two rectangles. Bull. calcutta Math. Soc. **43**, 17~24, (1951)
 - 33) SANTALÓ, L.A.: Integral geometry and geometric probability. Addison-wesley, Reading, Massachusetts, (1976)

- 34) 腰塚武志：積分幾何学について (1). O.R., **21**, 9, 524~529, (1976)
- 35) 腰塚武志：積分幾何学について (2). O.R., **21**, 10, 591~596, (1976)
- 36) 腰塚武志：積分幾何学について (3). O.R., **21**, 11, 654~659, (1976)
- 37) 腰塚武志：積分幾何学について (4). O.R., **21**, 12, 711~717, (1976)
- 38) 腰塚武志：積分幾何学について (5). O.R., **22**, 1, 40~45, (1977)
- 39) 腰塚武志：地域内距離について O.R., **21**, 2, 302~320, (1978)
- 40) 栗田 稔：積分幾何学. 共立出版, 東京, 116 pp., (1957)
- 41) 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)
- 42) LÜNZMANN, K.: Der Erschließungskoeffizient, eine Kennzahl zur Beurteilung von Waldwegenezen und seine Anwendung bei Neuplanungen. Forstw. Cbl. 87, (1968)
(藤原 登 抄訳：開発指数, 林道網評価のための指数及び林道網計画への適用. 機械化林業, 205, 29~39, 1970))
- 43) SEGBADEN, G.: Studies of cross-country transport distances and road net extension. Research note, No. 23, Department of operational efficiency at Royal College of Forestry, Stockholm, 1~70, (1964)
- 44) GRINELL, A. *et al.*: A ready reckoner for the planning of branch road networks for logging trucks. Research notes, Nr. 36, Institutionen for skogsteknik, Skogshögskolen, Stockholm, 1~48, (1970)
- 45) 堀 高夫 外：林内到達距離の分布に関する研究. 日林誌, **53**, 11, 355~358, (1971)
- 46) PIELOV, E.C. (南雲仁一 監訳): 数理生態学. 産業図書, 東京, 315 pp., (1974)
- 47) 古山正雄：都市の形について. O.R., **22**, 1, 20~30, (1977)
- 48) 井上源基：林道の線形に関する研究. 林業試験場研究業務報告要旨集, (1982・1983)
- 49) HAGGETT, P. *et al.*: Network analysis in geography. Edward Arnold, London, 348 pp., (1969)
- 50) HAGGETT, P.: 立地分析 (上) (下). 大明堂, 東京, 429 pp., (1976)
- 51) 千住鎮雄 外：輸送システムにおける走行距離に関する研究. O.R., **2**, 4, 273~284, (1977)
- 52) 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, 1~11, (1976))
- 53) MORISITA, M.: Measuring of the dispersion of individuals and analysis of the distributional patterns. Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. E (Biol) 2, 215~235, (1959)
- 54) CLARK, P.J.: Grouping in spatial distributions. Science, **123**, 373~374, (1955)
- 55) DACEY, M.F.: Description of line patterns. Northwestern Univ., Studies in geography, 13, 277~287, (1967)
- 56) 脇本和昌：Random ベクトルの和の長さの分布について. 統計数理研究所彙報, **16**, 2, 133~145, (1968)
- 57) 藤田睦博：流域地形構造とその統計則に関する基礎的研究. 土木学会論文報告集, 234, 73~81, (1975)
- 58) 藤田睦博：河道網における支流の分布特性に関する研究. 土木学会論文報告集, 246, 35~45, (1976)
- 59) 徳永英二：河川の分岐と流域構成について. 数理科学, **19**, 11, 45~50, (1981)
- 60) 戸川達男：血管の分岐. 数理科学, **19**, 11, 58~63, (1981)

- 61) 井上源基：トラクタ集材路網パターンの事例分析. 93 回日林論, 533～536, (1982)
- 62) 井上源基 外：地域性を考慮した集材方法の最適化に関する研究（Ⅳ）. 94 回日林論, 667～668, (1983)
- 63) 奥田吉春 外：地域性を考慮した集材方法の最適化に関する研究（Ⅴ）. 95 回日林論, 665～668, (1984)
- 64) 今富裕樹 外：地域性を考慮した集材方法の最適化に関する研究（Ⅵ）. 95 回日林論, 669～672, (1984)
- 65) 井上源基 外：地域性を考慮した集材方法の最適化（Ⅰ）. 国有林野技術開発試験報告書, 49～102, (1985)
- 66) 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, 1～139, (1980)
- 67) 井上源基 外：トラクタ集材作業による立木の損傷. 東大演習林報告, 66, 307～324, (1974)
- 68) 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（Ⅱ）. 91 回日林論, 461～463, (1980)
- 69) 井上源基：Simulation によるトラクタ集材路網. 農林水産研究. センターニュース, 18, 24～29, (1983)

Studies on the Tractor Skidding Road Network Planning II

Optimum planning of the tractor skidding road network for tractor logging.

Motoki INOUE⁽¹⁾

Summary

The objective of this study is to obtain the optimum design of a tractor skidding road network, which may present the most suitable and desirable method of skidding for a tractor logging operation not only from the view point of rationalization of logging operations, but also from that of environmental conservation in felling sites.

To realize such a purpose, the first step of this study was concentrated on finding out how to classify the different kinds of terrain condition on which a certain kind of logging operation could be carried out most economically and technically. Then from the results of several field investigations, we obtained the relation that a certain method of skidding is most suitable for a certain class of the terrain.

On the other hand, the types of existing tractor skidding roads and skid trail nets were investigated; this investigation was carried out from field datum practiced in Japanese forestry. The characteristics of these road nets were analyzed theoretically by using some assumed geometrical models. Consequently the tractor skidding road networks could be classified according to their types and functions.

Finally, the most useful and practical method of tractor skidding road network planning was discussed. Also, the optimum location and design of tractor skidding road nets, which should be currently available for every tractor logging site in Japan, was shown by applying the new method developed with the help of electronic computations.

This paper comprises four main chapters, namely, I. Analysis of terrain factors used in the tractor skidding road network planning, II. A theoretical analysis of classification of tractor skidding road nets and the relationship of the type of skidding method to terrain conditions, III. The method of design and route-location of tractor skidding road with the use of an electronic computer, IV. Evaluation and application of an tractor skidding road network planning to practical problems.

The results obtained in each chapter are summarized as follow.

1) In order to generalize the characteristics of the tractor skidding road network, the index (*f*-value) which describes the arrangement of the skidding road nets for a certain logging area and the index (*p*-value) which describes the form of patterns of the skidding road itself were derived from the theoretically geometrical model. The results obtained from the classification of the tractor skidding road network showed

Received March 10, 1987

(1) Forest Mechanization Division (Forestry Technology Division)

that the range of “f-value” was almost $0.78 \sim 8/3$ and the range of “p-value” was $0 \sim 1$ for the usual tractor skidding road nets. That is to say, the smaller the “f-value” is, the more irregular arranged the skidding road nets. It also became clear that the “p-value” to be close to 0 gives the convergent road (line) type and one to be close to 1 gives the divergent road (line) type. So the typical tractor skidding road network (randomly designed road net) on flat terrain showed that the “f-value” was $\frac{\pi}{2}$ and the “p-value” was $2/3$.

2) To find out numerous problems relating to the tractor skidding road nets planning, we developed a computer program to simulate the harvesting of logs by means of tractor logging which could be used in actual logging sites, and then calculated some of these problems by utilizing computer programs.

The results showed that the timber volume to be hauled from a logging site in m^3/ha varied as the degree of the skidding road density in m/ha and the prehauling distance by tractor-winch in m (winching distance), and also the skidding road density is always reversely proportional to the average winching distance. The mutual relationship between them would be considerably influenced by the terrain conditions and type of skidding road network.

In other words, the technically estimated ratio of the timber volume to be hauled might be called “The possible maximum yield of timber volume” (τ) (the volume of produced timber (w_a) divided by proposed timber output (w_e) on which it acts, $\tau = w_a/w_e$) could be given by a function, proportional to the skidding road density and average winching distance, and reversely proportional to the gradient of terrain surface. This ratio could then be respectively calculated by this function on the basis of the assumed type of skidding road nets.

3) For each topographic condition for the area of the tractor logging project, the most suitable and desirable method of skidding and the type of skidding road nets were proved. The most suitable average winching distance in m and the optimum number of landings could be given for each typical selection cut area (volume of timber: $50 \text{ m}^3/\text{ha}$) and clear cut area (volume of timber: $100 \text{ m}^3/\text{ha}$).

A summary of the results is shown below.

① The most suitable type of skidding road network could be suggested for every class of slope in the terrain, such as the mono road nets type and the convergent road nets type for flat and gentle slopes (less than 20%), the dendritic road nets type for hilly slopes (20~33%) and the complex skidding road nets type were supplemented by upgrading to a higher standard skidding road for steep and very steep slopes (more than 33%).

② The prehauling distance by winch (winching distance) became longer as the slope became steeper and shorter with the increasing volume of timber to be hauled in m^3/ha . In a usual selection cut area and clear cut area, the optimal average winching distance was about 5 m for flat and gentle slopes, 15~17 m for hilly slopes and 17~20 m for steep and very steep slopes.

③ The optimal average winching distance is almost proportional to the degree of ground roughness (especially obstacle density). For example, in the case of the

number of obstacles per unit area in $m^2 = 0.1$, the length mentioned above is increased 2~3 m longer for every type of skidding road net.

④ When the size of landing area per unit skidding site is constant, it is better that the number of landings is increased and the landing locations are scattered all over the logging area as the slope of terrain becomes flatter.

4) Usually the type of skidding road net applied on steep and very steep terrains (over 33%) consists of a complex interlacing of road nets with a higher grade skidding road (arterial skidding road) and a lower grade one (bifurcated or branched skidding road). So the optimal road density ratio between them, having a different structural standard, could be calculated by the theoretical formula on the basis of labour productivity to minimize the labour supply for logging. Then, if the ratio of worker necessary for the respectively divided operations is given, the most reasonable and suitable figures for each trunk skidding road density as well as the branched one could be simply obtained by applying $Z_1 \sim Z_3$.

5) The layout of a tractor skidding road was planned for an actual skidding site by applying the results obtained from this study.

The characteristics of every skidding road network could then be relatively evaluated from the view point of operational efficiency. The type of skidding road network, its arrangement, the order which each skidding road is applied to the forest area and the density ratio among skidding roads classified by structural standards could be objectively estimated. For selecting the most suitable route-location for skidding road nets, a computer program was also developed to maximize the operational efficiency and minimize the injuries of residual trees at the same time.

Although a more suitable and simplified method will be obtained by the synthetical and organizing treatment of the results of a number of investigations in the future, the author suggests the above method as being useful and practical for planning a tractor skidding road network in Japan.