

合理的集運材方式に基づく長期林内路網計画に関する研究

Planning of Long-Term Forest-Road Networks Based on Rational Logging and Transportation Systems

酒井 秀夫*

Hideo SAKAI*

目 次

I はじめに	2	2) 車両系集材方式	
II 林内路網計画の既往の研究		(1) 駐車型	29
1 既往の研究	3	(2) 林内走行型	
2 考察	4	a) トラクタによる全幹	
III 長期林内路網計画の考え方と林道の費用		材地曳集材	29
1 用語の定義	5	b) 載荷式集材	31
2 林道開設費と飽和密度の考え方		c) 専用作業路を利用し	
1) 林道開設費と償却費	6	た車両集材	33
2) 飽和密度の考え方	7	3) モノレール	34
3 長期林内路網計画の手順	8	4) モノケーブル方式	36
4 林道費用の算定		5 集材費用の算定	37
1) 運材費	8	6 飽和密度の算定	
2) 通勤輸送費	11	1) 林内路網密度と集材距離の換算	51
3) 林道の維持費	12	2) 総合集材費および飽和密度の算定	52
4) 林道の林業外費用	14	3) 考察	59
5) 林道の年間費用と規格構造	16	V 林道網配置と林道の規格構造	
IV 合理的集材方式と林内路網		1 年間木材通行量の算定	61
1 集材方式の選択と総合集材費	19	2 循環路網の評価	
2 対象とする集材方式	21	1) 循環路の木材通行量	62
3 標準伐区モデル	22	2) 複合循環路	66
4 理論方程式		3 適用	
1) 架空線集材方式		1) 資料	67
(1) 皆伐作業	25	2) 結果と考察	68
(2) 間・択伐作業	26	VI 考察	

*東京大学農学部林学科

.Department of Forestry, Faculty of Agriculture, University of Tokyo.

1) 総合集材費の正当性と作業道の必要性	73	5) 飽和密度の開設進度と限界林道密度との関係	76
2) 集材用車両専用作業路の密度	74	VII 結論	77
3) 林道の一部高規格化と飽和密度の変化	75	要旨	77
4) 複合路網密度理論との関係	76	引用文献	79
		Summary	81

I はじめに

林道は、木材生産はいうまでもなく、森林管理およびレクリエーション等の森林の公益的機能の発揮、あるいは地域産業の振興、住民の福祉にとっても不可欠な施設である。

わが国では、営々として林道網整備が行われてきた結果、全国平均の林内道路密度は、1982年現在、国有林、民有林あわせて10.8m/ha（内公道密度は6.9m/ha）に達している³⁵⁾。しかし一方で、林道をとりまく環境も大きく変化し、複雑化してきた。

すなわち、1973年のオイルショックを契機とする人件費および林道建設資材の高騰により、作業道と称する実質的には低規格の林道の開設が急増した。その結果、路面災害などの問題が顕在化し、また多様化した林道の適正な規格構造について、運材機能の面からも、検討をせまられている。

一方、林業そのものも周知のように、1950年代以降の拡大造林による人工林が間伐ないし主伐期を迎えたことと1965年以降の外材増加による国内林業の圧迫とから、施業の多様化と集約化がせまられている。とくに集材作業においては、小面積・非皆伐を対象とする作業システムの必要性から、従来の架空線集材方式、トラクタ集材方式に加えて、モノケーブル方式、モノレール、林内作業車等の種々の機械が開発・利用されている。

林内公道についても、一般的には施業機能を有するものと考えられてきた。しかし、一般交通量の増加に伴い、林業上多くの制約を受け、実情として運材機能面のみに限定評価せざるをえない場合も少なくない^{37,48)}。

このような林業および林道を取りまく環境の急速な変化に対応して、あらたな各種集材方式を含む合理的な集運材システムを確立するとともに、林道密度、配置、規格構造、機能あるいは公道との関連等について再検討し、あらたな林内路網計画を樹立することが、いまだ必要とする目標林内路網密度に程遠い状況にある今日、喫緊の要務となっている。

本論は以上の観点から、まず林道の主たる機能である施業機能について、間・択伐作業を含む多様化する施業内容に対処せしめるべく、高密度な路網を前提とした集材システムを確立するとともに、林道の輸送機能、規格構造をも分析・考察することによって、合理的な集運材シス

テムに基づく長期林内路網のありかたを検討しようとするものである。

本論文をとりまとめるにあたり、終始ご指導、ご助言を賜った東京大学上飯坂 實名誉教授ならびに南方 康教授に謹んで感謝の意を表す。また、資料収集に際してご協力賜った東京大学演習林の職員各位、東京大学森林利用学研究室諸氏、関係各位に、深甚の謝意を表す。

II 林内路網計画の既往の研究

1 既往の研究

林内路網計画に関する既往の研究は、路網密度に関する研究と路網配置に関する研究とに大別することができる。

路網密度に関する研究のうち、本論と関連のある既往の研究は以下のとおりである。

まず MATTHEWS²²⁾が、単位材積当り集材費と林道開設費の合計が最小になるように、林道間隔を決定することを試みた。

その後 HUGGARD⁹⁾、LARSSON¹⁹⁾、SUNDBERG⁴⁹⁾、上飯坂^{10,11)}らが、本質的には MATTHEWS の考え方にに基づきながらこの問題を発展させ、理論の精度をあげてきた²⁴⁾。平賀³⁾は、林道間隔と林地平均幅から分岐回数を求め、これに基づいて運材費を密度算定式に組み込むことを試みた。南方²⁴⁾は、施業循環団地の概念を導入して、造林・撫育費をも考慮しながら、販売価格を出発点として限界林道密度を与え、林道計画を現実的なものとした。南方²⁵⁾はのちに、労働投入量と林内歩行経費から基礎路網密度を示し、さらに近年、小規模集材システムと大規模集材システムを組合せた複合的路網を提唱した²⁸⁾。

このほかにも土場との関連を考えた研究があるが^{33,54)}、MATTHEWS の理論は、以上一連の研究をもって一応の完成を見たといえる。

一方、路網配置については、LUNZMANN²⁰⁾、HAFNER²⁾らによって配置形態が考察された。電算機の発達に伴って、平賀^{4,5)}、神崎¹³⁾は配置手法に関する研究を行った。酒井^{38,39)}は集材距離・林道開設長から最適配置を試みた。小林¹⁶⁾は費用便益比から開設順位および配置計画の研究を行った。

林道の規格構造に関する研究は、すでに MATTHEWS²²⁾によって、密度理論とともに検討が行われており、一般道路⁵⁵⁾においても古くから研究が行われている。米国では、BYRNES ら¹⁾の研究に基づいて車両走行費用を求め、年間輸送量と林道の維持・償却費から林道の構造を決定している⁵³⁾。平賀³⁾は、運材コストおよび輸送量と、改良工事費から、林道延長に対して改良の良否を検討した。沢口⁴⁷⁾は、舗装による維持管理費と車両走行費の節減効果、および主作業時間の

増大を、交通量に対して試算した。

南方²³⁾は、林道の線形と走行速度に関して基礎的研究を行った。

2 考 察

MATTHEWSをはじめとする一連の密度理論は、単一規格の林道費用に対して密度を決定するものであり、密度理論式の構造上の制約から一律に決定せざるをえない。しかしある程度林内路網が充実してくると、とくに車両燃費および開設単価の上昇している状況下においては、運材機能も無視しえなくなり、規格構造の適正な階層化をはかる必要が生じてくる。この点に関してはすでに MATTHEWS や LARSSON らも、林道費用が通行量によって変化することを指摘しており、個々の路線に対する規格構造の決定をしているが、路線ごとの個別の検討に終始しており、林内路網の全体計画に対して十分な位置づけがなされているとはいえない。また単一規格の場合でも、適正な規格構造の根拠を明確にする必要がある。

林道上の運材費は集材費や林道建設費に比して微小であり、車両損耗、燃料消費等、運材費に影響をおよぼす因子の計測が困難であることから、その研究が浅く、また実情としてそこまで掘りさげるだけの社会的必要性も希薄であった。しかし、燃料費および人件費が高騰し、路網整備に伴って小規模分散伐区による木材生産が行われるようになると、運材車両の適正な大きさも含めて、運材システムについて見直しを図る必要性が生じてくる。

従来、林道密度決定に際して、林道開設の償却費が大きなウェイトを占めていた。しかし、林道がある程度整備された段階にある施業団地の林道の償却状態をみると、償却の完了した林道、償却中の林道、あるいは公道に移管したもの、等様々であり、従来の密度理論式を用いる場合には、厳密にはこれらの林道を区分しなければならない。また、開設費が大きい場合に、短期に償却しようとする、最終目標密度が過少になり、全体の配置計画や規格構造に多大の影響をおよぼすおそれがある。このように、永続する林業経営において、永久施設としての林道の開設費を林道密度の最終目標決定因子として重きをなすことには問題がある。開設費の償却に関しては次章で詳述することにするが、本論では、理想的な林内路網整備目標を得るためには、林道の償却がすべて完了した状態を想定すべきであると考え、林道の開設償却費は、当面の木材生産費用として計上はしても、林道網計画上は、木材生産にみあった投資限界に基づくところの開設進捗を決定するだけのものとし、林道密度決定には関与しないものとする。この場合、密度決定は、施業団地の最終的な状態における林道の維持管理費と集材費との均衡が問題となる。その際、林道の維持管理費は集材費同様、時価で評価することができ、利率等の考慮は不要となる。

林内路網計画にとって、集材方式の決定と集材費用の算定は重要な作業であるが、従来の林道密度理論では、当時の事情からして集材方式は集材機またはトラクタによる皆伐作業に画一

的に限定されている。しかし、人工林率が高まり、林内路網が高密になれば、間・択伐等を含む森林作業が多様化・集約化し、また環境保全の面からも、小面積分散伐区となることは必至であり、将来の施業体系および林内路網体系に応じた伐出システムについて検討しなおす必要がある。

MATTHEWSをはじめとする一連の林道密度理論の他にも、PESTAL³⁴⁾に代表されるように、集材方式の最適集材距離から林道密度を決定する方法がある。加藤¹⁴⁾は、この方法と MATTHEWS 理論の融合を試みているが、南方²⁴⁾もすでに指摘しているように、道路費用が考慮されないために、道路の過剰投資になる危険性がある。最適集材距離が存在するのは、集材機作業のように架設撤去に多大の手間を要するものに限られており、高密路網による機動性を前提とした車両集材では、最適集材距離が存在してもその距離は極めて短く、集材費がそのまま集材距離に比例するものとみなすことができる（IV章参照）。

III 長期林内路網計画の考え方と林道の費用

1 用語の定義

わが国では、作業道と称する実質的には低規格の林道が近年盛んに開設されている。これは、行政的に各種の補助体系に応じて種々の作業道が指定されたことと、開設費の安い道路に対する需要が林業経営者側に強く存在しているからである。ここでは、普通運材トラックが走行可能でほぼ永久的使用に耐える林業用道路は、行政的名称の如何を問わず「林道」とし、「作業道」は一応小型運材トラックが通行可能な程度の規格を有する短期に償却される一時的な道路施設とする。トラクタや林内作業車、あるいは管理用ジープ等の特定車両のための、一般に急勾配、狭幅員の専用道路は、「作業路」と称して上記「林道」、「作業道」と区別することにする。

林内にはこのほかにも公道があるが、林内公道は、現時点では林道に準じた集材機能を有していても、将来の山村交通の増加を考慮した場合、計画上は原則として輸送機能のみ有するものとしておく方が無難である。したがって、とくに林内路網の整備期間を長期におく場合には、公道への出材は一応考えないものとして、林道・作業道の整備を図ることにする。しかしながら、やむをえず将来とも公道に出材しなければならない場合には、公道の集材機能をある程度割引くことによって施業林道としての役割を評価することにする。この評価手法については、最近の報告があるが³⁷⁾、なお今後の研究に待つこととし、本論では対象外とする。

次に「集材」は、林内の木材集積点から運材トラックの積込地点、すなわち一般には林道までの木材搬出工程とする。伐倒地点から林内集積点までの材の移動工程は「木寄」とする。したがって林内作業車やトラクタによる作業路上の小運搬は、実質的には運材であっても、その費用は集材費に繰入れることとする。モノレールやモノケーブル式による搬出も単なる運材と

みなすことができるが、運材トラックの積込地点までの搬出であれば、ここでは集材となる。架空線集材作業における搬器の横取作業は集材工程に含めるものとし、荷掛にいたるまでの横取以前の集積工程については木寄工程とする。そして集材費および集材方式の選択は、林道の規格には左右されないものとする。

2 林道開設費と飽和密度の考え方

1) 林道開設費と償却費

林道は時の経過によりその価値を減少しないものではあるが、林道の取得価額として、開設費は一定期限内に減価償却されるものとされている³⁶⁾。

たしかに林道開設費は木材生産原価の主要な要素ではあるが、永続する林業経営において、永久施設としての林道の開設費を林道密度の最終目標決定因子として重きをなすことには問題がある。例えば開設費が大きい場合に、短期に償却しようとする、最終目標密度が過少になり、全体の配置計画や規格構造に多大の影響をおよぼすおそれがある。

本論では、木材生産に要する費用を最小にする理想的な林内路網整備目標を得るためには、施業団地の林道の償却がすべて完了した状態を想定すべきであると考え、林道開設の償却費は、当面の木材生産費用として、あるいは会計法上の措置として計上はしても、目標林道密度の決定には関与しないものとする。この場合、林道密度決定に関与する林道の費用として、毎年の維持管理費だけが計上され、密度決定は、最終的な状態における施業団地全体の林道の維持管理費と集材費との均衡が問題となる。その際、林道の維持管理費は集材費同様、時価で評価することができ、利率や償却状態等の変動要素を省くことができる。林道開設費と償却費は、当面の木材生産にみあった投資限界に基づくところの開設進捗を決定するだけのものとなり、目標密度算定と現実の実施計画とは別個に扱われることになる。例えば、ある事業体の林道に投資できる予算を開設単価で除したものが、当該年度の林道開設量となり、現実には投資効果の高い路線から順次開設されていくことになる。開設進捗に関しては、限界林道密度理論²⁴⁾と関連させながら、VI-5)で考察する。

なお、わが国の民有林林道の現状をみると、林道開設費の事業者負担額はわずかに2.6%であり、国庫補助が50.8%をしめている(昭和57年度)³⁵⁾。林道の耐用年数を国有林野事業特別会計経理規程³⁶⁾に定められている、長期的に維持すべき幹線林道の15年にしたがうものとするれば、年間の事業者負担は、開設費に対して $0.026/15=0.0017$ (定額法による)の比率となり、後記の維持管理費の1割にしかならない。また未舗装(土造)自動車道の法定償却年数40年にしたがうものとするれば⁵⁶⁾、0.00065の比率となり、維持管理費のわずかに4%位にしかならない。一般に公共投資のときは減価償却は行わずに、財政支出として国民一般の負担に帰せしめているが²¹⁾、これらの数字は、現実には林道の公共的機能の部分がそれだけ大きいものと解釈すること

もできる。しかし、いずれにしても、林道の価値が時の経過によって減少しないかぎりにおいては、林道の償却年限がすんだ状態を考えれば、密度決定という整備目標策定にとって林道開設の償却費は関与しないものとする事ができる。

2) 飽和密度の考え方

いま n 種類の規格の林道において、それぞれの年間費用を r_i (円/年 m)、密度を d_i (m/ha) とする。集材費 (円/m³) は、従来の理論に従うものとして集材距離に比例し²⁸⁾、集材距離は林道密度に反比例するものとする。このとき、施業団地 1 ha について、単位材積当りの林道の費用と集材費の合計 F (円/m³) は、

$$F = \sum_{i=1}^n r_i \cdot d_i / V_y + a / \sum_{i=1}^n d_i + b \quad (3-1)$$

ただし、

添字 i : 林道の規格

V_y : 施業団地の 1 ha 当り年間平均出材量 (m³/年 ha)

a : 集材距離に対する集材費の比例定数。林道密度と集材距離の換算係数を含む (円/m³ · m³ · m/ha · m)

b : 集材費の定数項 (円/m³)

となる。

ここで $r_1 > r_2 > r_3 > \dots > r_n$ とすれば、 F は、 $d_1 = d_2 = \dots = d_{n-1} = 0$ のとき最小値をとる。また、IV章で集材費の算定を行うが、その際、複数の集材方式から集材距離に応じて集材方式を選択することによって集材距離に対する集材費の増加を抑えることができるので、また、集材距離にそれほど影響されない集材方式もあるので、その場合には $a = 0$ とすれば、 F は明らかに $d_1 = d_2 = \dots = d_{n-1} = 0$ のとき最小値をとる。

したがって、林道が最低規格のときに同時に林道の費用 r_i も最小であるならば、林道規格をすべて最低規格とした時に、集材費と林道費用の合計が最小となる。

このときの、すべて最低規格による林道密度を、本論では「飽和密度」とよぶことにする。ただし最低規格とはいっても、集材機能や運材機能等の林道として最少限必要な機能は備えているものとする。ここで林道の年間費用 r_i は、III-2-1) で述べたように林道の維持補修費となる。

一方、林道を利用する通行車両の経費については、III-4-5) で後記するように、運材費を道路利用費用として林道維持費に転化することにより、林道の規格構造の検討が可能となる。しかるに、林道の費用にあらたに運材費も加えたときに、林道維持費と集材費のみから与えられた飽和密度による最低規格のままでは、木材通行量によっては林道費用が高くなる場所が生じる。この場合、木材通行量に応じて適切な規格の林道に昇格させることによって、運材費も含めた林道費を、もとの林道費よりも部分的に安くしていくことができ、結局全体の費用を

最小に保つことができる。なお飽和密度の一部を高規格化することによる全体路網の平均維持費の増加による飽和密度の減少は一応無視することができる（VI-3）参照）。

従来の林道の規格構造決定は、与えられた道路の木材通行量に対して個別に検討していく方法がとられていたが、ここにおいて林道網計画として総合的に把握することができる。このような考え方は、路網整備計画の一環として、既設路網の見直しにも応用することができる。

3 長期林内路網計画の手順

飽和密度による長期林内路網ならびに合理的な集運材システムの計画手順をまとめると、以下ようになる。

施業団地内における実用上最低規格の林道の年間維持費を r_{yn} (円/年 m) とする。このとき飽和密度 D (m/ha) は、林道費と集材費の和 $F(d)$ (円/m²)

$$F(d) = r_{yn} \cdot d / V_y + C(d) \quad (3-2)$$

を最小にする d として与えられる。ここで $C(d)$ は、施業団地内において想定される主伐・間伐の集材方式について、これらを総合した総合集材費 C (円/m²) であり、次章(4-2)式にしたがって求める。 $F(d)$ 、 $C(d)$ は、(4-99)式を用いて集材距離の関数に相互に変換することができる。

次に、既設路網を参考にしながら、飽和密度に対する林道網配置を行う。この段階で、林内路網は量的には最適の状態となる。

飽和密度に対する路網配置図において、各路線の木材通行量を求め、この木材通行量に見合う林道規格を決定する。この段階で林道規格ごとの密度がはじめて与えられる。ここにおいて林道維持費と運材費とからなる林道費用が最小となり、結局、林道の償却が完了した時点においては、集材費、林道費、運材費の合計が最小となる。なおIII-4-5), V-3-2)で後記するように、施業団地が200~400ha程度であれば林道はほとんど最低規格で十分であり、施業団地が大きくなり、木材が集中して林道に流入するようになってはじめて、幹線林道が高規格になる。

4 林道費用の算定

1) 運材費

林道を高規格化すると、通行車両を大型化することができ、走行速度も大きくなるので、運材単価 (円/m・m²) は小さくなる。また路面状態や勾配も改善されるので、長期的にみれば、燃料消費量や車両および部品損耗費の節減効果も大きい。

一般道路の改良計画に関する経済性の研究は、自動車が出現した時点からさかんに行われてきたが⁵⁵⁾、車両経費には車両損耗のように直接測定が困難な要素が含まれているために、未だ不

確定な部分が少なくない。まして道路勾配が変化に富み、路面状態も良好でない山岳道路においては、さらに問題は未解決である。

ここでは、設計速度、路線勾配、路面の良否によって、表3-1のような4段階の林道規格を想定し、運材費の挙動を考察してみる。規格1は、幹線林道を前提としている。最低規格の規格4の林道は、支線として量的にも多く開設されることが予想されるので、その維持に十分留意して、緩勾配に設計するものとする²⁸⁾。また通行車両は、一応2 t車、4 t車、6 t車、8 t車とし、6 t車、8 t車は規格3、4の林道は走行しないものとする。

林道上の運材単価(円/m³)は、1時間当り運転経費(円/時)を平均走行速度(m/時)および積載量(m³)で除して得られる。なお積載量は、1 tにつき1 m³とし、往路は空荷とする。

1時間当り運転経費は、ここでは建設機械等における算定方法³¹⁾を運材作業の実情に則して多少修正した後、次式から求めることにする。

1時間当り運転経費

$$= 1 \text{ 時間当り損料} + \text{燃料油脂費} + \text{消耗部品費} + \text{運転労務費} \quad (3-3)$$

ただし、

1時間当り損料 = 基礎価格 × 損料率

$$\begin{aligned} \text{燃料油脂費} &= 1 \text{ 時間当り消費率} (\ell / \text{ps} \cdot \text{h}) \times \text{機関総出力} (\text{ps}) \times \text{燃料単価} (\text{円} / \ell) \\ &\quad \times (1 + e) \times g \end{aligned}$$

e : 燃料費に対する油脂費の割合

g : 勾配および路面に対する修正係数

消耗部品費 = 部品価格 × 損耗・補修率

下記の具体的数値を用いて(3-3)式を試算すると、表3-2のようになる。

2 t車の機械価格を1260千円、損料率を 435×10^{-6} 、出力を87psとし、4 t車はそれぞれ、2570千円、 385×10^{-6} 、159ps、6 t車は3290千円、 367×10^{-6} 、170ps、8 t車は4900千円、 352×10^{-6} 、224psとする³¹⁾。1時間当り燃料消費率は $0.036 \ell / \text{ps} \cdot \text{h}$ とし³¹⁾、 $e=0.1$ とする¹⁵⁾。消耗部品価格は、2 t車が130千円、4 t車が131千円、6 t車が209千円、8 t車が279千円とし³¹⁾、その損耗・補修率は、2 t車の場合、路面が良のとき 511×10^{-6} 、普通のとき 887×10^{-6} 、不良のとき 2020×10^{-6} とし、4 t車の場合、それぞれ 552×10^{-6} 、 930×10^{-6} 、 2064×10^{-6} 、6 t車の場合、路面良のとき 567×10^{-6} 、8 t車の場合、路面良のとき 578×10^{-6} とする³¹⁾。

ここでgは、数種の路線における筆者らの燃料消費測定結果²⁷⁾から勘案して、規格1のときを1としたとき、規格2、3のとき $1/0.7$ 、規格4のとき $1/0.8$ とする。

表3-2において、同一規格では、通行車両が大きくなるにしたがって1時間当り費用は高くなるが、積載量も大きくなるので、運材単価(円/m³)は結局安くなる。また同一車種に

ついてみれば、林道の規格が高級化することによって走行速度が大きくなるので、1 m 当りの運材単価はかなり小さくなる。したがって、林道の高規格化に伴って、通行車両も大型化すれば、運材単価を非常に安くすることができる。例えば、規格4の林道を規格1に昇格することにより、4 t車の運材単価は23%になり、さらに4 t車を8 t車に大型化すれば、規格4のときに比べて運材単価は15%にまでなる。

運材費の費用構成要素のうち、運転労務費の割合が最も高いが、燃料油脂費も1ないし2割を占めており、林道の規格によってその変動が大きいので、高規格化による節減効果が大きい。また消耗部品費の割合は小さいが、規格4になると著しく増加することが確認される。

表3-1 想定する林道規格

Table 3-1 Assumed forest-road standards

Standards	Design speed (km/h)	Road surface	Longitudinal grade
1	40	Good	Gentle
2	30	Good	Steep
3	20	Ordinary	Steep
4	10	Inferior	Gentle

表3-2 運材費

Table 3-2 Log-trucking cost

Truck size	Forest-road Standard	Depreciation (yen/h)	Fuel and oil cost (yen/h)	Tire cost (yen/h)	Driver cost (yen/h)	Total (yen/h)	Unit cost	
							(yen/km)	(yen/km·m ³)
2 t	1	548	345	66	1400	2359	59	59
	2	548	492	66	1400	2506	84	84
	3	548	492	115	1400	2555	128	128
	4	548	431	263	1400	2642	264	264
4 t	1	989	630	72	1400	3091	77	39
	2	989	899	72	1400	3360	112	56
	3	989	899	122	1400	3410	171	85
	4	989	787	270	1400	3446	345	172
6 t	1	1207	673	119	1400	3399	85	28
	2	1207	962	119	1400	3688	123	41
8 t	1	1720	887	161	1400	4168	104	26
	2	1720	1267	161	1400	4548	152	38

2) 通勤輸送費

林道規格構造の高級化によって走行速度を増加させることによって、林業作業現場への通勤時間が短縮され、通勤車両の走行経費も節約することができる。通勤時間短縮によって正味作業時間が増加し、同一作業量を対象とすれば、全体の通勤回数節減をもはたすことができ、大いに生産性の向上を図ることができる。ここでは、林業作業現場への通勤輸送費の算定を行うが、その前に、通勤車両の走行経費の節減について、賃金形態や通勤形態の面から考察を加えておく。

いま、 p 人乗り乗用車で通勤するものとする。林道改修前の通勤車両走行経費を k_1 (円/時)、往復通勤時間を t_1 (時/日) とし、林道改修後はそれぞれ k_2 , t_2 とする ($k_1 > k_2$, $t_1 > t_2$)。1日の基準作業量を達成するための正味作業時間を t_0 (時/日) とし、作業員賃金は、1チーム w (円/日) の日給に能率給を加給するものとする。

林道改修によって $t_2 - t_1 = \Delta t_0$ (時間/日) だけ作業時間が増加することによって、賃金を決定するための基準作業量も増加するので、このことによる加給分を Δw (円/日) として正味の時給を $w/t_0 = (w + \Delta w) / (t_0 + \Delta t_0)$ として不変とすれば、賃金支払合計は、1作業現場についてみればかわらない。ただし、正味作業時間増加により、作業員側からみれば1日の賃金は確実に Δw 増加する。一方、 k_1 から k_2 への低減と作業時間増加による通勤回数節減によって、走行経費は節減される。さらに作業現場が年間を通じて順次移動していく一般の場合には、作業時間増加による通勤回数の節減効果は、1日当りの生産性向上としてこれを走行経費とは別途に評価することができる。したがって、いずれにしても、通勤輸送に関しては、通勤車両の走行経費である k_1 と k_2 についてのみ考えればよいことになる。なお、作業現場集合を当該事業所の始業時刻として林道改修後も1日の作業時間が変わらないような場合にも、当該現場の作業日数は変わらないので、走行経費だけが節減される。

通勤用自動車の1時間当り運転費 (円/時) の算定は、運材費の場合と同じく (3-3) 式に準ずるものとする。ただし、自動車通勤に関する労務費は考慮しないことにする。なぜならば、林道網が整備された状態では、作業員自身1日の正味作業時間を確保しようと努め、賃金も実際の作業に対する評価として支払われるべきであるからである。また通勤に対して賃金を考慮すると、林内作業費が通勤時間の大小によって異なってくることにもなる。

1 施業期間 n 年間で、 V (m^3/ha) 生産するのに、 N_w (人/ha) の労働投入量を要するとすると、片道通勤距離および木材生産量に対する通勤費 (円/ $m \cdot m^3$) は、平均走行速度 ($m/時$) に対して、

$$1 \text{ 時間当り運転費} \times 2 \times N_w / p \cdot V \div \text{平均走行速度} \quad (3-4)$$

となる。

いま、表 3-1 の林道規格に対して、機械価格1000千円、出力102ps、2000ccの6人乗乗用車

を想定してみる。

運転1時間当たり損料率 313×10^{-6} 、燃料消費率 $0.034 \ell / \text{ps} \cdot \text{h}$ 、燃料単価 $140 \text{円} / \ell$ 、 $e=0.1$ とし³¹⁾、 g は規格1を1としたとき、規格2、3が $1/0.97$ 、規格4が $1/0.88$ とする²⁷⁾。消耗部品価格は40千円とし、損耗・消費率を規格1、2が 511×10^{-6} 、規格3が 887×10^{-6} 、規格4が 2020×10^{-6} とする³¹⁾。なお通勤用車両は、作業中は現場付近に駐車させておくものとする。したがってこの場合の供用1日当たり損料は、林道上の運転時間には直接関係なく、事業体全体の固定費用として木材生産コストに一定額加算することができるので、運材作業の場合とは異なり、上記損料率には含まないものとする。

集約的な施業として天竜地方スギ優良材生産(表4-5)を例にとり、 $V=1665$ 、 $N_w/p=150$ とすれば、通勤輸送費は表3-3のようになる。

表3-3より、運材費に対する通勤輸送費の割合は、2t車ないし8t車に対して、林道規格にかかわらず、それぞれ6ないし15%と、労務費用が含まれないかぎり、運材費に比べて僅少である。しかしながら、林道上の木材通行量に比例して育林、伐出作業用の通勤車両の通行量も発生することになるので、本論では運材費にこの林業作業用の通勤輸送費も加えることにする。

なお南方²⁵⁾は、作業員が現場に至る歩行経費を基礎的路網密度として道路に転化し、社会資本として蓄積することを提唱しているが、林業の通勤費用に対して社会資本を積極的に導入することを考えれば、III-4-4)でのべるように、林道の公共的機能の面からも林道の費用を評価しなければならない。

表3-3 通勤輸送費

Table 3-3 Transportation cost of labor

Forest-road standard	Depreciation (yen/h)	Fuel and oil cost (yen/h)	Tire cost (yen/h)	Driver cost (yen/h)	Total (yen/h)	Unit cost (yen/km·m ²)
1	313	534	21	—	868	4
2	313	551	21	—	885	5
3	313	551	35	—	899	8
4	313	607	81	—	1001	18

3) 林道の維持費

AASHOの道路標準積算便覧⁵⁵⁾によれば、道路の維持費用を、定期的表層維持、特別表層維持、路肩および側道維持、路側および排水維持、および構造物維持の一般的維持と、雪氷対策、交通制御等の交通サービス、および洪水、台風、地すべり、地震、事故等による不定期あるい

は災害補修に分類している。なお、この維持には建設、改良工事は含まれない。本論でもこの分類にしたがうことにするが、林道の場合、交通サービスの費用やパトロールのような道路管理費用は一般的維持費用に比して微小であり、道路の一般管理費用とともに林業経営全体の費用として扱うこともできるので、ここでは省略することにする。

路面の表層や路側、構造物等に関する一般維持費は、主に降水や車両の通行に起因する恒常的支出とみなすことができ、維持費は道路設備に投資価値を増すものではないから、従来の考え方²⁴⁾と同様、年間費用と考えることができる。

しかしこれらの具体的金額の算定は、土質、気象、道路構造、交通量、車種構成といった種々の物理的要因に影響されると同時に、重機の種類やその稼働率、あるいは予算の事業化といった管理主体の道路維持に対する取組方にも大きく影響される。さらにまた、道路開設後の路体経年変化、不定期に行われる砂利補給等の重点補修、あるいは前年度維持補修との相関といった年間変動に加えて、開設時の完成度、施工技術の巧拙等の不確定要素も加わり、現時点では維持費の統一的算定は極めて困難である。

林道維持費に関与する上記の要因は、条件が過酷な山岳に位置する林道の場合、それぞれ重要な研究課題ではあるが、本論では林道利用および降水による表層および路体・法面の損耗に対する維持費が、交通量および幅員に比例するものとし、その際、林道規格が上級になるほど開設費も高くなるものとする。また地形が急峻になるにつれて林道の開設費、維持費ともに増加するものとするれば、林道の一般維持費は開設費に比例するものと考えることができる。

したがって林道維持費をあらかじめ積算することが困難な現状では、過去の実績から、開設費用の時価に対する維持費の割合から維持費を決定するのが至当である。

開設費の時価に対する一般維持費の割合は、例えば平賀³⁾の全国の国有林林道を対象とした資料によれば、1.37%、谷本⁵¹⁾の林道高野竜神線16kmの3年間の管理実績によれば1.5%程度であり、とくに平賀の資料において普遍性があるものとみなせば、この割合は1.4%程度と見積もることができる。

一方、不定期の災害に対する復旧費用は、適正な投資という観点から林道維持費にあらかじめ考慮しておくのが妥当である。

林道の自然災害は、個々の路線について頻度、規模ともに特定しがたいものであると同時に、全国的にみても災害復旧費の年度間のばらつきが大きい(表3-4)。しかし表3-4によれば、昭和48年度から昭和58年度までの11年間において、災害復旧費は当時の開設単価に対して平均0.3%程度となる。この災害復旧費を一般維持費に加算すると、開設単価の約1.7%となる。

なお、開設単価に対する災害復旧費の割合が0.3%程度であっても、国家全体としてみれば相当な額に達するので、当然のことながら、災害に強く、補修費のかからない林道を設計・計画することが肝要である。また、仮に平均14m³/年 ha の木材生産を行う森林において、平均開設

単価100,000円/mの林道が20m/ha必要とし、開設費に対する維持費および災害復旧費の割合を1.7%としても、2,429円/m²の負担になり、林内路網密度決定に少なからぬ影響をおよぼすことが予想される。

表3-4 民有林林道の平均開設単価と災害復旧費

Table 3-4 Forest-road construction cost and repair cost for damage from natural disasters on private forests in Japan

Year	Forest-road length (km)	Repair expenses (1000yen)	A	B	C	D	Repair cost/construction cost A/D (%)
			Average repair cost (yen/m)	Forest-road construction length (km)	Construction expenses (1000yen)	Average construction cost C/B (yen/m)	
1969	38,851						
1970	42,129	1,531,431	39				
1971	44,856	4,035,249	96				
1972	47,338	7,697,950	172				
1973	49,341	1,301,249	28	2254	43,867,700	19,462	0.14
1974	50,663	6,068,757	123	1954	45,614,336	23,344	0.53
1975	50,152	7,793,341	154	1458	46,609,640	31,968	0.48
1976	51,217	10,170,217	204	1332	55,655,602	41,781	0.49
1977	52,536	2,469,804	48	1442	69,654,172	48,310	0.10
1978	55,340	3,166,603	60	1802	92,644,232	51,412	0.12
1979	57,175	8,118,779	147	1953	116,362,432	59,581	0.25
1980	59,106	5,781,298	101	1841	118,816,449	64,546	0.16
1981	61,255	9,619,334	163	1680	120,594,483	71,782	0.23
1982	62,954	23,774,925	388	1611	120,962,350	75,085	0.52
1983		15,394,450	245	1656	121,951,224	73,642	0.33
1984				1721	119,604,866	69,497	

1) This table is prepared from (35) .

2) (Average repair cost) = (Repair expenses) / (Forest-road length of the previous year)

4) 林道の林業外利用

林道は木材や林業作業員の輸送以外にも、山村住民の生活、レクリエーション、観光等による林業外利用の交通があり、いわゆる公共的機能も有している。林業外利用の交通そのものは、林業にとって費用のかかるものではないので、林業の費用計算からは無視することができよう。しかし、林業外利用の交通量が多くなって、路面損耗、安全施設の設置等、林道の維持管理費がかさんでくれば、この費用を林業経済の範囲内でまかなうことは不合理となってくる。

いま、林道の維持管理費が交通量に比例する場合を考える。また高規格の林道の方が低規格の林道よりも、交通量に対する負担が軽いものとする。図3-1は、このような関係を模式的に示したものである。固定費用の部分は、交通量によらない主として降雨による部分とし、規

格構造に比例するものとする。

沢口⁴⁷⁾による全国207路線の調査によれば、一般交通量の林業的利用に対する比率は、林道の規格によらず、昭和54年当時で35%位である。ただし、交通量の絶対量そのものは、高規格になるほど大きい。この割合にしたがって林業的利用と林業外利用の交通量を図3-1に書き加えると、林業が負担する林道維持管理費に対して、林業外利用の許容台数は、高規格な林道ほどそのわくが大きく、低規格の林道は一般的利用には耐えきれないことがわかる。すなわち、高規格な林道ほど公共性が高く、低規格な林道ほど林業的色彩が濃いことが確認される。

本論では、前記35%程度の林業外利用ならば、木材生産によって林道の維持管理費を十分まかなうことができるものとして扱うことにする。

しかし、図3-1の①に示す部分は本来、林業以外の外部経済に対して支払い請求できるものである。さらに一般交通量が増加して林業が負担する林道維持管理費をこえた場合には(図中②), 林業サイドの持ち出しとなるので、当然外部に対して支払い請求できるものである。ま

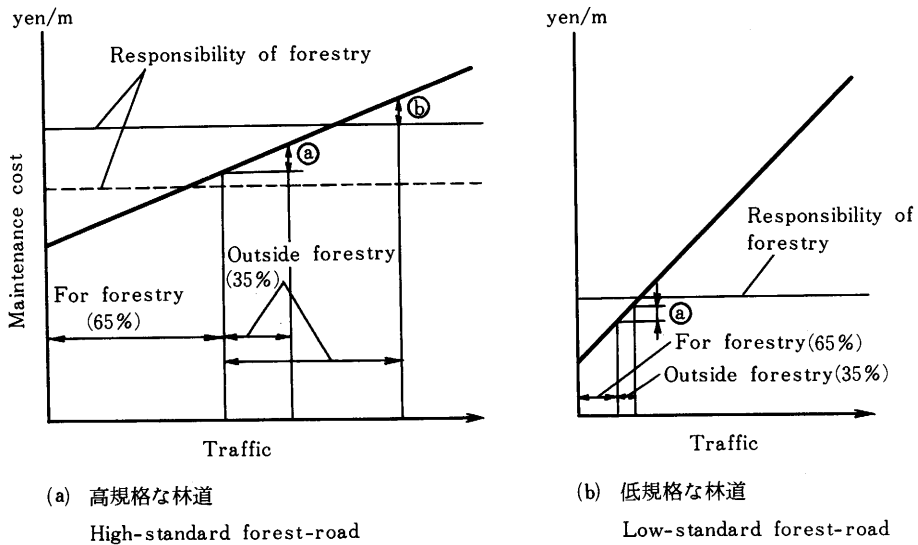


図3-1 林業が負担する維持管理費の限界の模式図

Fig. 3-1 Limit of the responsibility of forestry for forest-road maintenance costs

た、林業的利用による林道の維持管理費すら負担することができないほど経営条件が満たされていない場合には(図中破線)、図中㊸の少なくとも一般交通量によって不足する維持管理費については、外部経済から是非とも導入しなければならない。

このように、林業外利用による交通量に対する維持管理費は、外部経済に対して林道の維持管理費あるいは一部開設費の支払請求の十分な根拠を有し、林道の公共的機能の費用として直接評価することができる。

現状として、一般交通量が多くなって林業のみでは林道の維持費を負担しえなくなったり、自然災害の多発によって維持費をまかないきれない場合には、道路改良や公道への移管が行われる。これらの措置は、単に交通量のみではなく、実際には住民要求や行政的なものもあって、この分析は本論の目的とするところではないが、とくに幹線道路となりうる路線については、将来派生する一般交通量を計画段階で見込んでおくことがのぞましい。

5) 林道の年間費用と規格構造

規格 i の林道の年間維持費を r_{y_i} (円/年 m)、年間木材通行量を V_r (m³/年) とし、運材費に通勤輸送費を加えた単価を u_i (円/m³・m³) とする。このとき林道の年間費用 r_i (円/年 m) は、

$$r_i = r_{y_i} + u_i \cdot V_r \quad (3-5)$$

となり、 u_i は上式の傾きを与え、維持費に運材・通勤輸送費を加算することができる。

表 3-1 の林道規格について、 r_i を試算してみる。林道の年間維持費は、III-4-3) より開設単価の約 1.7% 程度を見込むものとするが、規格 1, 2, 3, 4, の r_{y_i} をここではそれぞれ条件の良い(a)1200, 900, 500, 150 と、条件の悪い(b)2000, 1200, 800, 300 の地域を仮定することにする。 u_i は表 3-2 と表 3-3 の合計値を使用することにする。通行車両は、主伐材の搬出を考慮して最低規格の林道でも 4 t 車が通行できるものとし、規格 2 以上では 8 t 車を使用するものとする。規格 2 以上の林道は、規格 3, 4 の林道から 4 t 車も流入することになるが、8 t 車と 4 t 車の構成割合は計画対象地域の形状によって異なるので、規格 2 以上の林道の u_i は、対象地域の林道網配置に応じて与えられる車種ごとの木材輸送量に対する過重平均値を使用することにする。ここではとりあえず図 3-2 に示す傾きを与える状況を想定することにする。なお規格 3, 4 から規格 1, 2 の林道に入るときに、4 t 車から 8 t 車への木材の積換はないものとする。

このとき両地域の r_i は図 3-2 のようになり、年間木材通行量に応じて年間林道費用を最小にする林道規格が与えられる。すなわち、

$$r_{i \min} = \text{Min} (r_{y_i} + u_i \cdot V_r) \quad (3-6)$$

ただし、

Min: () 内から最小となるものを選択する記号

をみたとす i が、当該 V_r に対する林道規格となる。

図 3-2 より、低規格林道ほど林道維持費に対する運材費の割合が大きくなり、また林道維持費の条件が悪い (b) では、年間木材通行量が約 46,000 m³ 以上にならないと規格 1 の林道が望めないことがわかる。図 3-2 は、既設林道の改修・整備の検討にも応用することができる。

林道網配置に対する具体的な木材通行量の分析は V 章で行うが、林道の年間木材通行量は当該林道より上流の全木材生産量に相当する。したがって、規格 i の林道を採用するのに必要な最低木材通行量 V_{ri} に対して、その所要森林面積 A_i (ha) は、1 ha 当り年間平均出材量を V_y (m³/年 ha) とすれば、

$$A_i = V_{ri} / V_y \quad (3-7)$$

となる。

(3-7) 式より、計画対象面積が、(a) では約 200~300 ha 以上、(b) では約 300~400 ha 以上になると、林道の規格階層化を考慮しなければならない。計画対象面積がこれよりも小さい場合には、林道規格を最低規格の単一規格とすることができ、(3-2) 式より r_{yn} と集材費から最適密度を容易に決定することができる。なお A_i について、 u_i に通勤輸送単価を含む場合と含まない場合を比較すると、低規格林道の場合にはそれほど差異はないが、 u_i の小さい高規格林道になると数百 ha のちがいが生じてくる。

計画対象地域の林道規格が最低規格でも十分ということになれば、林道密度は高くなり、均一な路網配置が可能となる。均一配置のとき、計画対象地域の平均運材距離 L_n (m) は、密度によらず一定となり、地域の重心までの距離に等しくなる。また、林道密度も (3-2) 式が示すように L_n や u に関与しない。林道規格が最低規格の単一規格のとき、(3-1) 式の最小値 F_{min} (円/m²) は、

$$F_{min} = 2 \sqrt{r_{yn} \cdot a / V_y} + b \quad (3-8)$$

となる。従来 r_{yn} はその規格水準の選択・決定に明確な根拠を与えられていなかったが、(3-8) 式の第 1 項とこのときの運材・通勤輸送費 $u_n \cdot L_n$ (円/m²) を比較すると、 r_{yn} を大きくして u_n を小さくするよりも、 u_n は犠牲にしてもなるべく r_{yn} を小さくするほうが有利であることがたしかめられるので、林道維持費が少なくてすむ方向に最低規格を選択すればよいことになる。

なお、運材・通勤輸送費 $u_n \cdot L_n$ は、計画対象地域の平均木材通行量を \bar{V}_r (m³/年) 、林道密度を d (m/ha) とすれば、 $u_n \cdot \bar{V}_r \cdot d / V_y$ ともあらわすことができるので、

$$\bar{V}_r / L_n = V_y / d \quad (3-9)$$

なる関係を導くことができる。(3-9) 式は今後、林道密度、平均木材通行量、平均運材距離の簡易な関係式として有用と思われる。

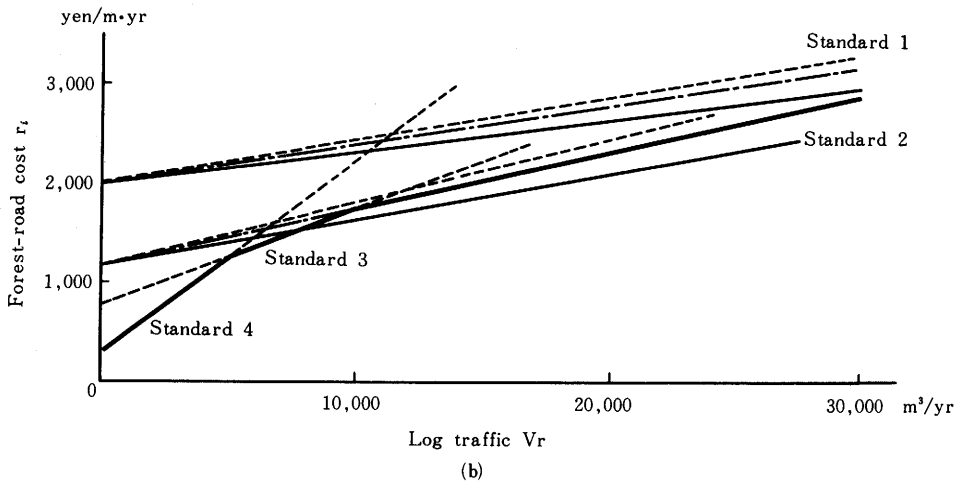
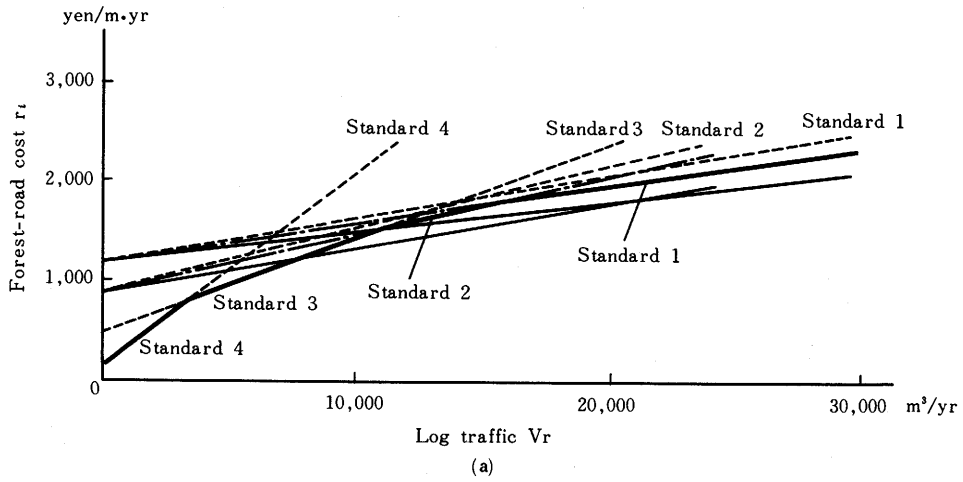


図 3-2 年間木材通行量と林道の費用

Fig. 3-2 Log-traffic and forest-road cost

..... 4t trucks; —— 8t trucks; - - - - 4t and 8t trucks; —— minimum cost

IV 合理的集材方式と林内路網

1 集材方式の選択と総合集材費

林内路網が整備された施業団地においては、主伐・間伐作業あるいは択伐作業が集約的に処々で行われ、集材方式も種々の選択が可能である。複数の集材方式が使用可能な条件下においては、集材費を最小ならしめる集材方式を作業規模や間伐作業などの施業に応じて逐次選択していくことによって、集材費の増加を極力おさえることができる。

いま、ある集材方式の最大作業距離 L (m) に対する集材費を $f(L)$ (円/㎡) とする。使用可能な複数の集材方式が存在する場合、それぞれの $f(L)$ の中から、 L に対して最小となるものを逐次選択することによって、集材費を最小にする集材方式を選択することができる。このときの最小集材費を $F(L)$ (円/㎡) とする。すなわち、

$$F(L) = \text{Min } f(L) \quad (4-1)$$

ただし、 Min は複数の $f(L)$ の中から最小となるものを選択することを意味する。

なお、主伐・間伐を通じて、同一伐区内の伐採木はすべて同一地点に出材するものとする。

このとき、ある年度における施業団地内の間伐・主伐を総合した最小集材費 $C(L)$ (円/㎡) は、

$$C(L) = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot V_i \cdot F_i(L)}{\sum_{i=1}^n S_i \cdot V_i} \quad (4-2)$$

ただし、

$F_i(L)$: 第 i 回間伐時の $F(L)$ (円/㎡)。 $i = n$ のときは主伐時。択伐作業の場合は、 $n = 1$ とする。

V_i : 第 i 回間伐時の 1 ha 当り出材材積 (㎡/ha)

S_i : 伐区面積 (ha)

で与えられる。

林内路網整備と相まって、施業団地が法正状態に達し、面積平分法による伐採が成立するものとするれば、 S_i がすべて等しくなるので、(4-2) 式は、

$$C(L) = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot F_i(L)}{\sum V_i} \quad (4-3)$$

となる。(4-3) 式は、施業団地内の 1 伐区について、第 1 回間伐から主伐までを総合した平均集材費でもある。本論では $C(L)$ を総合集材費とよぶことにする。

ここで $F(L)$ を決定するための $f(L)$ は次のようにして求めることができる。

まず労務費単価 $P(L)$ (円/㎡) は、集材人工数 Y (人時) と機械の架設撤去人工数 R (人時) の合計 T (人時) から、

$$P(L) = w \cdot T / V_a \quad (4-4)$$

$$=w (m \cdot C_y(L) / V_t + R / V_a) \quad (4-5)$$

ただし、

$$T = Y + R \quad (4-6)$$

$$Y = m \cdot C_y(L) \cdot V_a / V_t \quad (4-7)$$

w : 賃金 (円/人時, 保険料も含む)

m : 集材作業人員 (人)

$C_y(L)$: 集材作業の平均サイクルタイム (時/回)

V_t : 1回当たり平均積載量 (m^3 /回)

V_a : 1伐区当たり総出材量 (m^3)

となる。

また $1 m^3$ 当りの機械損料 $M_p(L)$, 燃料油脂費 $F_u(L)$, 集材機作業等における標準器材費 K は²⁶⁾,

$$M_p(L) = P_s (0.5(1+k)CR_s + M_s + MT_s + k \cdot MY_s \cdot LY_s) / Y_s \cdot LY_s \cdot D_o \quad (4-8)$$

$$F_u(L) = FV_s \cdot FC_s \cdot (1+e) / Y_s \quad (4-9)$$

$$K = RIG / V_c \quad (4-10)$$

ただし、

$$Y_s = 6V_t / C_y(L) \quad (4-11)$$

機械作業の1日の工期 (m^3 /日)

年間標準実働日数 = $k \times$ 年間標準供用日数

CR_s : 機械の償却費率

D_o : 年標準実働日数 (日)

LY_s : 機械の耐用年数 (年)

M_s : 機械の定期整備費率

MT_s : 機械の現場修理費率

MY_s : 機械の年間管理費率

P_s : 機械の価格 (円)

e : 油脂費その他の燃料費に対する比率

FV_s : 機械の燃料消費量 (ℓ /日)

FC_s : 機械の燃料単価 (円/ ℓ)

RIG : 集材機作業等の標準器材費 (円)

V_c : 同上平均耐用数量 (m^3)

となる。

そして, $f(L)$ は,

$$f(L) = P(L) + M_p(L) + F_u(L) + K \quad (4-12)$$

となる。

本論では $C_y(L)$ を与えるその他の基本的な諸量を, T_L : 荷掛時間 (時/回), T_U : 荷卸時間 (時/回), $T_{LU} = T_L + T_U$, v_1, v_2 : 搬器または車両の平均走行速度(往復) (m/時), v_1', v_2' : 平均横取速度 (往復) (m/時) と決めておく。

$C_y(L)$ の算定は理論方程式に基づいて行う。理論方程式は実績値に基づくよりも客観的であり, 走行速度や積載量等の諸因子に対する考察が容易であるので, 条件変化に柔軟に対処することができるからである。従来種々の理論方程式が導びかれているが, 本論では集材用機械の性能を作業条件に応じてさらに高める立場にたつて, 作業員配置や木寄工程, 機械の待時間等を考慮しながら, あらたな理論方程式を導びくことにする。

2 対象とする集材方式

林業労働力の高齢・減少化が確実視されている現在, 林内路網整備を図りながら, 他方では, 林業機械の適正な開発を推進していくことが必要である。集材方式は, 技術革新に伴い, 今後ともさらに変容していく可能性があり, 最終的な林内路網を考える場合には, 予想しうる, しかも実現可能な最良の集材方式を検討の対象としなければならない。この点に関して南方²⁶⁾は, 大型機械導入の可能性について論じているが, ここでは, 表4-6に掲げてある集材方式を対象とした。

架空線集材方式は, 地形急峻なわが国では高度な技術体系を有しており, その横取機能により, 架線の地上高が高ければ, 間・択伐作業も含めて広範囲の作業が可能である。

車両系集材方式には, 道路沿にタワー付集材車やトラクタ等を駐車させて, 付属のウィンチやクレーンにより林内を直接集材し, そのままトラック運材する駐車型車両集材方式と, 専用作業路や直接林内を走行する林内走行型車両集材方式とがある。

駐車型集材方式は, 機械架設の手間が少なく, 機動的な作業を行うことができるので, 間・択伐作業にも適している。傾斜にもそれほど影響されないので, 将来, 林内路網整備に伴って機械の出力を十分に活用した大型機械化の方向が確立されれば, すでに欧米諸国において見られるように, その機動性を活用して有用な集材方式になることは想像に難くない。なお, この集材方式は, ハイリード式やグランドリード式等の集材方式の他に, スラックライン式やラングスカイライン式等の簡易な索張方式を用いることもできる。しかし, ここではこれらの横取機能はないものとみなし, その機動性を生かして道路上を順次移動しながら集材作業を行うものとするにすることにする。

林内走行型集材方式は, 現時点の作業形態から,

a. 全幹材地曳集材

b. 載荷式による林内自由走行集材

c. 専用作業路を利用した集材

に区分することができる。

a はここでは緩傾斜地の皆伐作業におけるトラクタ全幹材集材を考える。林内には搬出用に一時使用のトラクタ作業路が作設され、付属ウィンチによって全幹材を作業路まで木寄した後、作業路上を地曳集材するものとする。

b は林内作業車やフォアワダで直接林内を自由走行しながら集材する方法である。回転半径を小さくしなければならぬので玉切り材を載荷するものとし、載荷可能な材の大きさから、ここでは間・択伐作業を対象とする。この方法は林地傾斜や地表条件の制限をうけるが、材に接近することができるので、高度な省力作業が可能である。

c は集材用車両のための専用作業路上に木寄された材を、林道まで車両運搬する方法である。わが国では、それほど緩斜地でない場合にこの種の専用作業路が作設されることが少なくない。積載方法も地曳式、載荷式、半載荷式、トレーラ式と様々である。この専用作業路は、通常、数伐区にまたがることが多く、比較的長期にわたってくりかえし使用されるので、a の一時的なトラクタ作業路とは性格が異なる。とくに基幹となる専用作業路は、路網整備計画によって一般車両が通行可能な低規格林道に昇格する場合もありうる。

モノレール、モノケーブル方式は、機械価格が低廉であることもあって、間伐材搬出用として普及している。両者はそれ自体集材機能をもたないため、あらかじめ木寄作業を必要とする。モノレールの機関車に木寄用ウィンチを装着したのももあるが、ウィンチ使用時は運行を停止しなければならないので、機関車本来の機能を発揮するにはもう1台の機関車が必要である。モノレール方式は往復型の運材作業という点で架空線集材方式に類似しているが、架空線集材方式に比べて積載量、走行速度の点で不利ではある。しかし、架設が簡易で、林内に比較的自由に路線設定することができるので、間・択伐作業を対象に短距離集材には適する。モノレール、モノケーブル方式は、林内路網が整備された段階で、車両系集材方式に対してどのような展開をするのか検討を要するところであるが、往復型と循環型という特徴的な作業形態であるので、対象に含めることにする。

3 標準伐区モデル

伐区の大きさは、地形、森林所有面積や林相、気象、育林上、あるいは林内路網等の観点から総合的に決定されるものであって、本来は集材方式によって限定されるものではない。しかし、架空線集材方式のように機械の架設撤去に手間を要する集材方式の場合には、出材量の多少が集材費に影響をおよぼすことになる。

地形急峻なわが国では、架空線集材方式が代表的な集材方式の1つであり、架設撤去に手間

を要するので、まず架空線集材方式について集材距離に対する平均的な伐区形状を定めておくことにする。この手続によって、作業規模を集材距離の関数として集材費に組み込むことができ、他の集材方式もこの伐区形状に準ずるものとすれば、作業規模のちがいによる各集材方式間の集材費の変動を考慮することができる。

いま、伐区の形を統計的見地からほぼ矩形⁴³⁾とし、図4-1のような伐区モデルを考えることにする。集材用架線のスパン長 L (m) に対して、架線方向の伐区長を αL 、伐区の中央幅を βL 、平均集材距離を γL とする。

架空線集材方式やモノケーブル方式は、伐区が林道から離れていても作業することができるが、林内路網が整備された状態を想定して、伐区は林道に近接しているものとし、 $\alpha=1.0$ とする。そして、他の集材方式との比較を容易にするためにも、スパン長=最大集材距離とし、 $\gamma=1-\alpha/2=0.5$ とする。 β は、筆者らによる全国的なアンケート調査結果から、 $\beta \doteq \alpha/2.5$ となるので⁴³⁾、 $\beta=0.4$ とする。

なお、このとき伐区面積 S (ha) は、

$$S = 0.4L^2 \times 10^{-4} \quad (4-13)$$

となる。

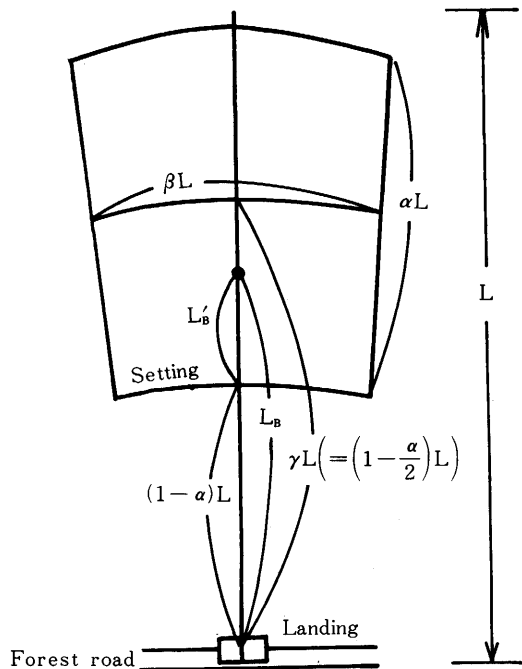


図4-1 標準伐区モデルと L_B および L'_B

Fig. 4-1 A standard-setting model and definition of L_B and L'_B

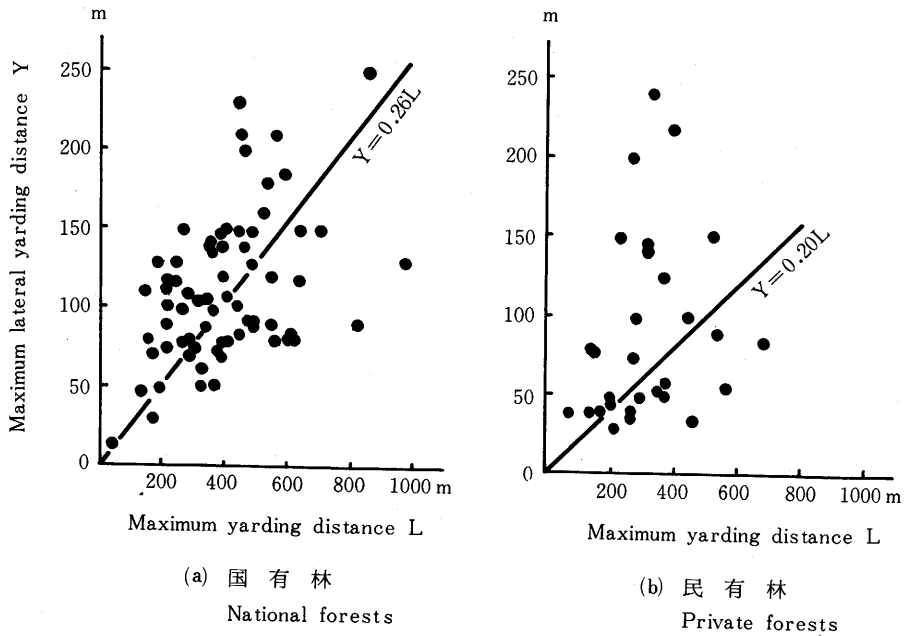


図 4-2 集材距離と横取距離の関係 (皆伐作業)

Fig. 4-2 Relationships between yarding distance and lateral yarding distance (clear cutting)

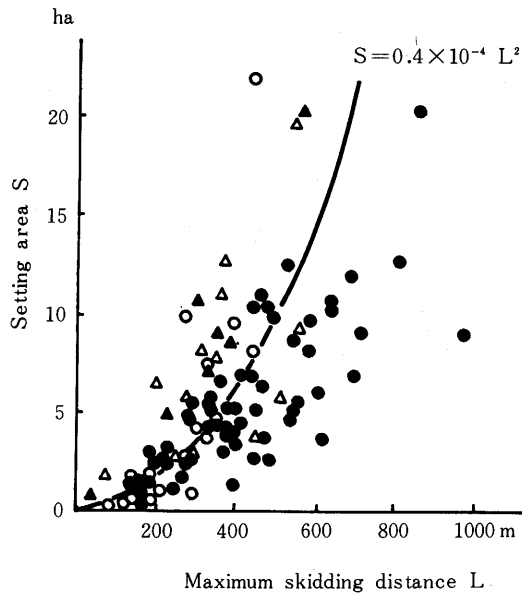


図 4-3 最大集材距離と伐区面積の関係 (伐区が林道に隣接している場合)

Fig. 4-3 Relationships between maximum skidding distance and setting area ($\alpha \approx 1$)
Black dots, national forests; white dots, private forests; Δ , settings needing changing of skylines

以上 α , β の係数について、同じアンケート調査結果から、まず最大横取距離 $\beta L / 2 = 0.2 L$ について検証すると⁴⁵⁾、資料の性格上ばらつきは大きい、現実の数値に近いことが確認される(図4-2)。さらに最大集材距離と伐区面積の関係を調べると(図4-3)、 $\alpha = 1.0$, $\beta = 0.4$ を平均的な値として使用しても妥当であることが確認される。

したがって、本論では、以上の伐区形状を標準伐区モデルとして扱うことにする。

4 理論方程式

ここでは各集材方式の理論方程式の誘導過程を示す。なお誘導過程そのものは本論の主題から離れることになるので、具体的な論旨の展開は次節の集材費用の算定以降となる。

1) 架空線集材方式

架空線集材方式の理論方程式には、集材機の機械性能に基づく小山¹⁸⁾や、サイクルタイムに基づく例えば森岡²⁹⁾の式があるが、本論では、架空線集材方式の大きな特徴である横取機能と架線の張替についてあらたに考察を加えることにする。

(1) 皆伐作業

架空線集材作業の作業工程は、搬器の主索上の移動、横取作業、および荷掛・荷卸作業(荷掛フックの昇降等も含む)に分けることができる。したがって、図4-1の伐区モデルにおいて、集材作業の平均サイクルタイム $C_y(L)$ (時/回) は、

$$C_y(L) = \gamma L(1/v_1 + 1/v_2) + T_{Lu} + \beta L(1/v_1' + 1/v_2') / 4n \quad (4-14)$$

ただし、

n : 1 伐区当りの架線本数

となる。ただし、架線地上高、索張力による横取能力は十分あるものとする²⁹⁾。

一方、集材架線の架設人工数は L に比例し^{40,44)}、撤去人工数は架設人工数に比例し^{40,44)}、扇形に架線を張替える場合の張替人工数は一定⁴⁰⁾とする。このとき、集材架線の架設撤去および張替人工数 R (人時) は、

扇形張替の場合、

$$R = k_1(1+k_2)L + k_3 \cdot (n-1) \quad (4-15)$$

ただし、

k_1 : 架設人工数の L に対する比例定数 (人時/m)

k_2 : 撤去人工数の架設人工数に対する比例定数

k_3 : 張替人工数 (人時)

元柱ごと逐一替えていく、いわゆる魚骨形張替の場合、

$$R = k_1(1+k_2)n \cdot L \quad (4-16)$$

となる。

したがって架空線集材方式の総所要人工数T (人時) は、(4-6)式において、 $\partial T/\partial n=0$ より、

扇形張替の場合、

$$n = \frac{\beta L \times 10^{-2}}{2} \sqrt{\frac{m \cdot \alpha L \cdot V_n \cdot (1/v_1' + 1/v_2')}{k_3 \cdot V_t}} \quad (4-17)$$

魚骨形張替の場合、

$$n = \frac{\beta L \times 10^{-2}}{2} \sqrt{\frac{m \cdot \alpha \cdot V_n \cdot (1/v_1' + 1/v_2')}{k_1(1+k_2)V_t}} \quad (4-18)$$

の架線本数のとき最小となり、最小人工数 T_{\min} (人時) は、

扇形張替の場合、

$$T_{\min} = m \cdot \alpha \beta L^2 V_n \times 10^{-4} \{ \gamma L(1/v_1 + 1/v_2) + T_{LU} \} / V_t + [k_1(1+k_2)L - k_3 + \beta L \times 10^{-2} \sqrt{k_3 \cdot m \cdot \alpha L \cdot V_n \cdot (1/v_1' + 1/v_2')} / V_t] \quad (4-19)$$

魚骨形張替の場合、

$$T_{\min} = m \cdot \alpha \beta L^2 V_n \times 10^{-4} \{ \gamma L(1/v_1 + 1/v_2) + T_{LU} \} / V_t + [\beta L^2 \times 10^{-2} \sqrt{m \cdot \alpha \cdot V_n \cdot k_1(1+k_3)(1/v_1' + 1/v_2')} / V_t] \quad (4-20)$$

となる。両式の [] の部分は、横取作業と張替に関する人工数であり、残りの部分が搬器の主索上の移動ならびに荷掛・荷卸作業に関する人工数になっている。

(2) 間・択伐作業

架空線集材作業は、その横取機能を活用して間・択伐作業を行うこともできる。

間・択伐作業における横取作業では、筆者のアンケート調査によれば、残存立木による影響が圧倒的に多く(表4-1)、最大横取距離も大体20~40mまでであり、皆伐作業の1/3から1/4である⁴⁴⁾。したがって間・択伐作業では、皆伐作業と異なり、横取能率や地形によるよりも、まず残存立木密度から横取距離の限界をあらかじめ規定しておく必要がある。

間・択伐作業において代表的な索張方式である帯広式や岩大式、ダブルエンドレス式のように、荷上索が1本の索張方式の場合、残存立木の障害に対して横取可能な最大距離 L_y (m) は、筆者らの実用式³²⁾によれば、 $P(x)=0.95$ をみたす x (m) として与えることができる。ここで $P(x)$ は、

$$P(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-2.5a \cdot A \cdot x_i)) \quad (4-21)$$

ただし、

$$n = 2 \sqrt{3} x / 2.5a + 1$$

A : 残存立木密度 (本/ha)

a : 立木の平均胸高直径 (m)

である。

a および A に対する L_y の計算結果を示すと表4-2のようになる。表4-2より、とくに幼

表 4-1 横取作業の障害要因のアンケート調査結果

Table 4-1 The results of a questionnaire on obstacles to lateral yarding

(a) 皆伐作業

Clear cutting

Obstacles	Frequency	Examples (Frequency)
Low clearance of skyline	39	Lowering of efficiency near tail tree (12), obstructed by stumps (5), obstacles to haul line (2), obstructed by streams (1)
Streams, small ridges, ground surface	31	Contact of skyline with ridge (2), obstacles to loading-hook (2), contact of logs with ridge (2)
Stumps, roots	26	Logs or haul line snagged (2)
Position of setting, direction of slope	23	Deep valley (7), obstacles to haul line (2), unfavorable yarding direction (3), obstacles to tail tree (2), obstructed by ridge (1)
Long lateral yarding	12	Lowering of efficiency (Five settings changing skylines.)
Remaining stands	11	Obstacles to haul line (6), contact of haulback line with stands (2), wolf tree (1), increase of manual prehauling (1)
Ground vegetation, bush, branches	9	Obstacles to haul line (3), obstacles to signal (1), obstacles to hooking (1)
Rocks	7	Logs are snagged, obstacles to haul line
Steep slope	7	Dangerous (3), logs are stuck to slope (2), unfavorable concentration of logs in valley (2)
Shelterbelt	6	
Climate	3	Freezing of logs (3)
Others	10	Position of stumps for blocks (2), falling of large-sized logs when hooking (1), too near landing (1), wear of lines in pumice area (1), near intermediate support (1), too short lateral yarding by multi-spans (1), blind area from a yarder (1), manual haulback of loading-block (1), protection of ground (1)
No influence	46	Reason: Sufficient skyline-clearance (5), short lateral yarding (2), favorable terrain (2), frequent use of haul line (1)
No comment	58	

(b) 間・択伐作業

Commercial thinning or selection cutting

Obstacles	Frequency	Examples (Frequency)
Remaining stands	23	Obstacles to haul line or lifting line (6), protection of young stands (4) or valuable stands (2), obstacles to changing stumps for blocks (1)
Streams, ridges	3	Obstacles to haulback line (1)
Low skyline clearance	2	
Ground vegetation	1	
Long lateral yarding	1	Lowering of efficiency

Unstable rocks	1	Dangerous
Climate	1	Obstacles to changing a skyline by snowfall
Implement	1	Disorder of lifting line at drum
No influence	3	Reason: Favorable terrain (2)
No comment	6	

Investigated in September, 1977

Totalizaion overlaps.

表 4-2 間・択伐作業における限界横取距離 L_y (m)

Table 4-2 Maximum lateral yarding distance L_y (m) for thinning or selection cutting

Average D.B.H. a (cm)	Number of remaining stands A (No./ha)												
	8000	6000	5000	4000	3000	2000	1000	800	600	500	400	300	200
5	68	85	*										
6	52	65	86	*	*								
8	33	42	56	80	*	*							
10	23	29	39	57	95	*	*						
12		21	29	43	72	*	*	*					
14			22	33	57	*	*	*	*				
16				26	45	*	*	*	*	*			
18				21	37	93	*	*	*	*	*		
20				17	31	79	*	*	*	*	*	*	
22					26	67	91	*	*	*	*	*	
24					22	58	79	*	*	*	*	*	
26					18	51	69	*	*	*	*	*	*
28					16	44	61	90	*	*	*	*	*
30					13	39	54	79	*	*	*	*	*
32					12	35	48	71	91	*	*	*	*
34					10	31	43	64	82	*	*	*	*
36					9	27	38	58	75	*	*	*	*
38								52	68	93	*	*	*
40								47	62	85	*	*	*
42								44	57	78	*	*	*
44									52	72	*	*	*
46									48	66	98	*	*
48									44	61	91	*	*
50										57	85	*	*

*, Over 100m

齡林では平均胸高直径の影響が少くないことがわかる。

この L_y に対して集材作業の平均サイクルタイム (時/回) は,

$$C_y(L) = \gamma L(1/v_1 + 1/v_2) + T_{LU} + L_y(1/v_1' + 1/v_2')/2 \quad (4-22)$$

となる。

一方、集材架線の架設撤去および張替人工数 R (人時) は、
扇形張替の場合、

$$R = k_1(1+k_2) L + (\beta L / 2L_y - 1) k_3 \quad (4-23)$$

魚骨形張替の場合、

$$R = k_1(1+k_2) \beta L^2 / 2L_y \quad (4-24)$$

となる。

2) 車両系集材方式

(1) 駐車型

伐区形状は図4-1の伐区モデルに従うものとする。集材方向は車両を中心に扇形になるが、車両は迅速に道路上を移動することができ、間・択伐作業においても自動開閉ブロック等の使用により自由に林内木寄を行うことができるので、伐区幅による集材上の制約はとくに考えないことにする。

集材工程は、荷掛フックの引込み・巻上げと荷掛・荷卸作業からなるので、最大集材距離 L (m) に対して、平均サイクルタイム $C_y(L)$ (時/回) は、

$$C_y(L) = L(1/v_1 + 1/v_2) / 2 + T_{LU} \quad (4-25)$$

ただし、

v_1, v_2 : 材の引寄および空フックの引込速度 (m/時)

となる。

本方式は、集材用車両のウィンチ容量の制約もあって一般に集材距離が短かく、索張方式も簡易なので、集材架線の架設撤去人工数は小さく、 L によらず一定とすることができる。車両駐車および集材架線の架設撤去に要する1回当りの人工数を R (人時) とする。

(2) 林内走行型

a. トラクタによる全幹材地曳集材

トラクタ集材の理論方程式は、架空線集材と同様にトラクタの性能から導いた小山¹⁸⁾や、作業因子の重回帰分析から導いた小島¹⁷⁾の式がある。本論では、架空線集材方式の場合と同様に、要素作業のサイクルタイムから、トラクタ集材の理論方程式を導くことにする。

まずウィンチ木寄時間からトラクタ専用集材作業路の最適密度を求める。

トラクタ専用作業路密度 d_t (m/ha) と作業路迂回率 η_t 、平均木寄距離 \bar{S} (m) の間には、

$$d_t = 2500 (1 + \eta_t) / \bar{S} \quad (4-26)$$

が成り立つものとする (IV-6-1) 参照)。

このとき、作業路作設費および木寄費の合計 G (円/m²) は、

$$G = r_t \cdot d_t / V_n + C_{pt} \cdot C_t / V_{pt} \quad (4-27)$$

ただし、

r_t : 作業路の作設単価 (円/m)

V_n : 1 ha 当り出材量 (m³/ha)

$$C_t = \bar{S} (1/v_1' + 1/v_2') + T'_{LU} \quad (4-28)$$

木寄の平均サイクルタイム (時/回)

v_1' , v_2' : ウィンチの往復木寄速度 (m/時)

T'_{LU} : 木寄 1 回当りの荷掛および荷卸時間 (時/回)

V_{pt} : 木寄 1 回当りの荷掛材積 (m³/回)

C_{pt} : 木寄 1 時間当りの費用 (円/時)。 (4-36) 式参照。

となり、G は、

$$d_t = 50 \sqrt{C_{pt} \cdot V_n (1 + \eta) (1/v_1' + 1/v_2') / r_t \cdot V_{pt}} \quad (4-29)$$

のとき、最小値

$$G_{min} = 100 \sqrt{r_t \cdot C_{pt} (1 + \eta) (1/v_1' + 1/v_2') / V_n \cdot V_{pt} + C_{pt} \cdot T'_{LU} / V_{pt}} \quad (4-30)$$

をとる。

一方、作業路上の平均運材距離は、水平集材距離 L (m) に対して、トラクタの登坂限界角 ϕ に基づく林地傾斜 θ による集材距離の延長を考慮しなければならないので、

$$L (1 + \eta) \tan \theta / 2 \sin \phi \quad (4-31)$$

ただし、

$\theta \geq \phi$ 。 $\theta \leq \phi$ の場合は $\tan \theta = \sin \phi$ とする。

となる (図 4-4)。

作業人員を m 人とし、(m-1) 人で木寄ならびに集運材作業を行い、土場作業を 1 人で行うものとする。このときトラクタ集材の集材費 f(L) (円/m³) は、作業路上の運材費用と G_{min} の合計に、木寄作業時の土場作業の 1 人分労務費用を加えたものとして与えられる。すなわち、

$$f(L) = C_p \cdot C_y(L) / V_t + G_{min} + w \cdot C_t / V_{pt} \quad (4-32)$$

ただし、

$$C_y(L) = L (1 + \eta) \tan \theta (1/v_1 + 1/v_2) / 2 \sin \phi + T_{LU} \quad (4-33)$$

作業路上運材の平均サイクルタイム (時/回)

v_1 , v_2 : 作業路上の往復走行速度 (m/時)

V_t : トラクタ積載量 (m³/回)

T_{LU} : トラクタへの材の装着および荷卸時間 (時/回)。土場での巻立作業時間があれば、これに含める。

$$C_p = m \cdot w + M_t(L) \quad (4-34)$$

集材 1 時間当りの費用 (円/時)。

$$M_t(L) = \frac{P_s(0.5(1+k)CR_s + M_s + MT_s + k \cdot MY_s \cdot LY_s)}{6LY_s \cdot D_o} + FV_s \cdot FC_s \cdot (1+e) / 6 \quad (4-35)$$

1時間当り機械費・燃料費 (円/時)。(4-8), (4-9) 式参照。

$$C_{pt} = (m-1)w + M_t(L) \quad (=C_p - w) \quad (4-36)$$

$$C_t = 50 \sqrt{r_t \cdot V_{pt}(1+\eta)} (1/v_1' + 1/v_2') / C_{pt} \cdot V_n + T'_{LU} \quad (4-37)$$

(4-28) 式参照。

となる。

また, 1日の功程 Y_s (m^3 /日) は,

$$Y_s = 6V_t / (C_y(L) + p \cdot C_t) \quad (4-38)$$

ただし,

p : トラクタ積載量を満たすために必要な木寄回数 (回) ($=V_t/V_{pt}$)。

となる。

b. 載荷式集材

i) 木寄と集材を並行して行う場合

この作業方式では車両が林内に到着するまでの時間を利用して木寄が行われる。集材用車両が林内を自由に走行することができるものとすれば, 積載量を満たすための木寄範囲も, 木寄能率に応じて適当に決定することができる。ここでは材が間伐された玉切材であり, 木寄範囲を大きくする必要もないので, 木寄は1人でも行えるものとし, このときの平均木寄能率を V_p (m^3 /人時) とする。

本方式においては専用作業路は原則として作設しないので, 林内走行はなるべく傾斜方向とし, 横転の危険性から適用可能な林地傾斜を $\theta \leq \phi$ に限定する。伐区形状は図4-1によるものとし, 伐区内の平均集材距離を $\alpha L(1+\eta)/2$, 伐区外の運材距離を $(1-\alpha)(1+\eta_s)L$ とする。ただし, η_s は伐区外における迂回率である。

いま作業人員は最少の2人とし, 1人が車両を運転し, この間に1人が木寄をするものとする。積込作業は2人で行い, 積載量を満たすのに木寄が間に合わない場合には, 運転手も木寄作業を手伝うものとする。

このとき, 伐区内において車両の運行と木寄能率がつりあう距離 L'_B (m) は (図4-1),

$$V_t/V_p = C_{ts} + L'_B(1+\eta)(1/v_1 + 1/v_2) + T_U \quad (4-39)$$

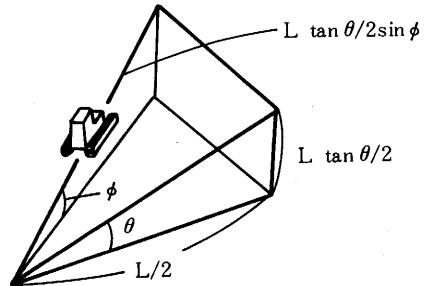


図4-4 林地傾斜による作業路の迂回

Fig. 4-4 Detour of spur-road caused by slope θ , slope grade; ϕ , maximum climbing grade of tractor

ただし,

$$C_{ts} = (1 - \alpha) L (1 + \eta_s) (1/v_{1s} + 1/v_{2s}) \quad (4-40)$$

伐区に到達するまでの伐区外走行の往復時間 (時/回)

v_{1s}, v_{2s} : 伐区外における車両の往復走行速度 (m/時)

より,

$$L'_B = (V_t/V_p - T_U - C_{ts}) / (1/v_1 + 1/v_2) (1 + \eta) \quad (4-41)$$

となる。

図4-1において, $\alpha L \leq L'_B$ のときは, 車両の運行サイクルタイム $C_v(L)$ (時/回) に対して, 残余の木寄材積 $(V_t - C_v(L) \cdot V_p)$ (m³) を2人で木寄することになるので, 木寄も含めた全体のサイクルタイム $C_y(L)$ (時/回) は,

$$C_y(L) = C_v(L) + (V_t - C_v(L) \cdot V_p) / 2V_p + T_L \quad (4-42)$$

$$= C_v(L) / 2 + V_t / 2V_p + T_L \quad (4-43)$$

ただし,

T_L = 積載時間 (2人作業) (時/回)

となる。伐区内の平均集材距離 $\alpha L (1 + \eta) / 2$ に対して $C_v(L)$ は,

$$C_v(L) = \alpha L (1 + \eta) (1/v_1 + 1/v_2) / 2 + C_{ts} + T_U \quad (4-44)$$

で与えられる。

具体的数値によって図4-1の $L_B (= L'_B + (1 - \alpha) L)$ を試算してみると, L_B は数百 m 以上であり, $V_p = 6$, $\alpha = 1$ の条件の良いときでも $L_B = 400\text{m}$ であるので, 林内路網が整備されていれば, まず $\alpha L \leq L'_B$ が成り立つものと考えてよい。

仮に $L'_B \leq \alpha L$ のときは, (4-43) 式と, 伐区内の区間 $[L_B, \alpha L]$ のサイクルタイム $C_2(L)$,

$$C_2(L) = (\alpha L + L'_B) (1 + \eta) (1/v_1 + 1/v_2) / 2 + C_{ts} + T_L + T_U \quad (4-45)$$

とをそれぞれの出材量の比 $L'_B / \alpha L$, $(\alpha L - L'_B) / \alpha L$ に対して合成して, 全体の平均サイクルタイムは,

$$C_y(L) = \alpha L (1 + \eta) (1/v_1 + 1/v_2) / 2 + C_{ts} + T_L + T_U + (V_t/V_p - C_{ts} - T_U)^2 / 4 \alpha L (1 + \eta) (1/v_1 + 1/v_2) \quad (4-46)$$

となる。

(4-43), (4-46) 式の $C_y(L)$ に対して, 本方式の労務費単価 $P(L)$ (円/m³) は (4-5) 式で与えられ, とくに (4-43) 式については,

$$P(L) = w \{ 1/V_p + (\alpha L (1 + \eta) (1/v_1 + 1/v_2) / 2 + 2T_L + C_{ts} + T_U) / V_t \} \quad (4-47)$$

となる。

なお車両の運行と木寄能率が，車両が伐区に到達する以前につりあうのは ($L_B \leq (1 - \alpha)L$),

$$L_B = (V_t / V_p - T_U) / (1 + \eta_{ts}) (1 / v_{1s} + 1 / v_{2s}) \quad (4-48)$$

が成り立つときになるが，試算すると L_B が数百 m 以上となり，伐区が林道から非常に遠い場合であるので，ここでは考えないことにする。

ii) あらかじめ木寄された桧を順次積載していく場合

林内にあらかじめある程度十分な桧を木寄したのちに，1人で集材車両を運転しながらこれを集材していくものとする。その他の条件は i) と同じとする。

このとき車両集材に関する平均サイクルタイム $C_y(L)$ (時/回) は，

$$C_y(L) = \alpha L (1 + \eta) (1 / v_1 + 1 / v_2) / 2 + C_{ts} + 2T_L + T_U \quad (4-49)$$

となる。この費用 $w \cdot C_y(L) / V_t$ (円/m³) に 1 m³ 当り木寄費 w / V_p (円/m³) を加えた労務費単価 $P(L)$ (円/m³) は，(4-47) 式と同一になる。ただし，(4-8)，(4-9) 式で与えられる機械費，燃料費は，(4-43) 式と (4-49) 式のサイクルタイムが異なるため，差異が生じる。

なお本方式において，林内の走行路確保に費用をかける場合には，これも見込まなければならない。

c. 専用作業路を利用した車両集材

専用作業路上に木寄された材を，林道まで車両運搬するこの作業形態は，後記のモノレール集材に類似している。しかし，専用作業路の費用は，1伐区の作業量のみからは求めることができず，他の伐区の出材量や作業期間から算定しなければならないので，その点モノレール集材とは異なる。この専用作業路の所要密度については，別途算定する (VI-2) 参照)。

i) 木寄と集材を並行して行う場合

前節 b と異なり，林内から作業路まである程度の距離を木寄しなければならないので，木寄手を2人とし，運転手は1人とする。車両到着後，木寄材積が積載量に満たない場合には，運転手も最少限に木寄作業を手伝うものとし，積込は運転手と木寄手1人の2人で行い，他の1人は木寄を続行するものとする。

この場合には，(4-39)，(4-42) 式を

$$(V_t - T_L \cdot V_p) / 2V_p = L'_B (1 + \eta) (1 / v_{1s} + 1 / v_{2s}) + C_{ts} + T_U \quad (4-50)$$

$$C_y(L) = C_v(L) + (V_t - T_L \cdot V_p - 2C_v(L) \cdot V_p) / 3V_p + T_L \quad (4-51)$$

とすればよい。この場合の労務費単価 $P(L)$ (円/m³) も (4-47) 式と同一になる。

$L'_B \leq \alpha L$ のときの全体の平均サイクルタイム $C_y(L)$ は，(4-46) 式と同様にして，

$$C_y(L) = \alpha L (1 + \eta) (1 / v_{1s} + 1 / v_{2s}) / 2 + C_{ts} + T_L + T_U + (V_t / 2V_p - C_{ts} - T_U - T_L / 2)^2 / 3\alpha L (1 + \eta) (1 / v_{1s} + 1 / v_{2s}) \quad (4-52)$$

となる。

しかし、 V_p が大きくなり、 $V_p \geq V_c / (2T_u + T_L)$ となると、(4-50) 式で与えられる L_B が $L_B \leq 0$ となるので、この場合には、

$$C_y(L) = \alpha L (1 + \eta) (1/v_{1s} + 1/v_{2s}) / 2 + C_{ts} + T_L + T_u \quad (4-53)$$

となり、木寄手には常に待ち時間が生じる。

なお木寄に木寄用ウィンチ等の機械を併用する場合には、これらの機械費も加えなければならない。

ii) あらかじめ木寄してから集材する場合

あらかじめ作業路上に木寄しておいてから 1 人でこれを集材していく場合のサイクルタイム $C_y(L)$ (時/回) は、(4-49) 式同様、

$$C_y(L) = \alpha L (1 + \eta) (1/v_{1s} + 1/v_{2s}) / 2 + C_{ts} + 2T_L + T_u \quad (4-54)$$

となり、労務費単価 $P(L)$ (円/㎡) は、(4-47) 式と同一になる。

3) モノレール

モノレール作業の理論功程式は、すでに筆者ら⁴²⁾によって示されており、その考え方は以下のとおりであるが、ここではあらたに路線間隔の決定に関して補足することにする。モノレールの路線選定については、木寄作業と集材作業の作業能率を最大にする選定方法があるが³⁰⁾、ここでは路線間隔を次のようにして導く。

モノレールの伐区外走行は不利であるので⁴²⁾、伐区は林道に接しているものとし、出材量 V_a (㎡) および路線の架設撤去人工数 R 人時は路線長 L (m) に比例するものとする。すなわち、

$$V_a = k_4 \cdot L \quad (4-55)$$

$$R = k_5 \cdot L \quad (4-56)$$

ただし、

k_4, k_5 : 定数

したがって、このときの架設撤去に関わる労務費単価は、 $k_5 \cdot w / k_4$ (円/㎡) となる。

モノレールの路線に対して集材区域の幅、すなわち路線間隔を Y_w (m) とし、このうち上げ木集材の割合を h 、下げ木集材の割合を $(1-h)$ とする。このとき、平均木寄能率 V_p (㎡/人時) は、

$$V_{pu} = V_{ptu} / m_u \{h \cdot Y_w (1/v_{1u} + 1/v_{2u}) / 2 + T_{0u}\} \quad (4-57)$$

$$V_{pd} = V_{ptd} / m_d \{(1-h) Y_w (1/v_{1d} + 1/v_{2d}) / 2 + T_{0d}\} \quad (4-58)$$

ただし、

添字 u, d : それぞれ上げ木集材、下げ木集材を意味する。

m : 木寄人員 (人)

V_{pt} : m 人に対して、1 回当りの木寄材積 (㎡/回)

v_1, v_2 : 木寄の移動速度 (往復) (m/時)

T_0 : 木寄に関わる荷掛, 荷卸等の固定時間 (時/回)

となり, h は V_{pu} と V_{pd} を等しく置くことによって求めることができる。

いま, 伐区幅 Y (m) の林地に n 本の路線を平行に架設するものとすれば, 路線 1 m 当りの木寄・架設撤去人工数 $T_p(n)$ (人時) は,

$$T_p(n) = m_u \cdot h \cdot Y \cdot V_w \{ h \cdot Y (1/v_{1u} + 1/v_{2u}) / 2n + T_{0u} \} / V_{ptu} + m_d \cdot (1-h) \cdot Y \cdot V_w \{ (1-h) \cdot Y (1/v_{1d} + 1/v_{2d}) / 2n + T_{0d} \} / V_{ptd} + k_5 \cdot n \quad (4-59)$$

ただし,

V_w : 単位面積当りの出材量 (m³/m²)

$$V_w \cdot Y_w = k_4 \quad (4-60)$$

となり, $T_p(n)$ は,

$$Y/n = \sqrt{2 \cdot k_5 / V_w \{ m_u \cdot h^2 (1/v_{1u} + 1/v_{2u}) / V_{ptu} + m_d \cdot (1-h)^2 (1/v_{1d} + 1/v_{2d}) / V_{ptd} \}} \quad (4-61)$$

のとき最小値をとり, 右辺がこのときの路線間隔 (= Y_w) となる。

モノレール作業の木寄方法を例えば人力木寄による下げ木集材のみとして, $m_d = 2$, $h = 0$, $T_{0d} = 0$ とすれば, このときの木寄能率 (m³/人時) および路線間隔は, (4-58), (4-61) 式より,

$$V_p = V_{ptd} / Y_w (1/v_{1d} + 1/v_{2d}) \quad (4-62)$$

$$Y_w = \sqrt{k_5 \cdot V_{ptd} / V_w (1/v_{1d} + 1/v_{2d})} \quad (4-63)$$

となり, (4-60), (4-62), (4-63) 式より,

$$k_4 = k_5 \cdot V_p \quad (4-64)$$

なる関係をうる。(4-64)式から, 路線間隔を決定する場合の木寄費用 w/V_p (円/m²) は $k_5 \cdot w/k_4$ となり, 前記の架設撤去費に等しいことがわかる。すなわち路線間隔を架設撤去費と木寄費が等しくなるような木寄能率を与えるように決定していることになる。また V_p は, 本来は木寄距離である Y_w によるものであるが, ここにおいて林地の状況に応じて与えられる定数とみなすことができる。実際には木寄作業にウィンチによる上げ木集材を併用したり, 地形に応じた路線配置をしたりすることもあるので, ここでは V_p は当該林地の平均値を用いることにする。

さて, モノレール作業の作業人員を, 代表的な作業形態である木寄兼積込 2 人, 荷卸 1 人の 3 人 1 組とすると, 機関車の運行と積載量を満たすための木寄時間がつりあう運材距離 L_B (m) は, 運行時間 = 木寄時間の関係より,

$$L_B = (V_t / 2V_p - T_0) / (1/v_1 + 1/v_2) \quad (4-65)$$

ただし,

v_1, v_2 : 機関車の往復運行速度 (m/時)

T_U : 荷卸時間 (時/回)

V_t : 積載量 (m³/回)

となる⁴²⁾。林業用モノレールは、一般にレール上を自動走行するので運転要員は不要であり、機関車の運行時間を利用して木寄しておく方が有利である。

$L \leq L_B$ のときは、機関車に待ちが生じ、作業能率は木寄と積込能率に依存することになるので、このときのサイクルタイム $C_y(L)$ (時/回) は、

$$C_y(L) = V_t / 2V_p + T_L \quad (4-66)$$

ただし、

T_L : 荷積時間 (時/回)

となる。

$L \geq L_B$ になると、 L_B をこえる区間のサイクルタイム $C_2(L)$ (時/回) は、機関車の運行に依存することになり、

$$C_2(L) = (L + L_B) (1/v_1 + 1/v_2) / 2 + T_L + T_U \quad (4-67)$$

となる。したがって、 $L \geq L_B$ のときの平均サイクルタイム $C_y(L)$ は (4-66)、(4-67) 式を合成して、

$$C_y(L) = L (1/v_1 + 1/v_2) / 2 + T_L + T_U + (V_t / 2V_p - T_U)^2 / 2L (1/v_1 + 1/v_2) \quad (4-68)$$

となる⁴²⁾。

労務費 $P(L)$ (円/m³) は、(4-66)、(4-68) 式の $C_y(L)$ に対して、(4-64) 式に等しい架設撤去費用を加えて、(4-5) 式より、作業人員が3人のとき、

$$P(L) = w(3C_y(L) / V_t + 1 / V_p) \quad (4-69)$$

となる。

4) モノケーブル方式

モノケーブル方式の循環索は、伐区周囲の谷沿に集積された極に沿って架設される場合が多く、実際には地形の影響を大きく受ける。しかし理論方程式を導くに当たっては、循環索を林内に自由に張りめぐらせることができるという本方式の特長を生かして、林内木寄距離の短縮を考慮した路線配置を行うものとする。

伐区形状は図4-1に従うものとし、林道から伐区最遠まで L (m) とする。循環索の架設撤去人工数 R (人時) は、循環索長に比例するものとするれば、

$$R = k_6 \cdot \{ 2(1 - \alpha)L + L_s \} \quad (4-70)$$

ただし、

k_6 : 比例定数

L_s : 伐区内循環索長 (m)

となる。

ここでは林内木寄は人力によるものとする。木寄能率 V_p (m^3 /人時) は、作業距離に反比例するので⁴⁶⁾、平均木寄距離 $\alpha\beta L^2/4L_s$ (m) に対して、

$$V_p = k_7 \cdot L_s / \alpha\beta L^2 \quad (4-71)$$

ただし、

k_7 : 定数

とすることができる。

一方、サイクルタイム $C_v(L)$ (時/回) は、索が循環しているため、結局荷掛時間 T_L (時/回) に依存し、

$$C_v(L) = T_L \quad (4-72)$$

となる。

したがって、(4-70) ~ (4-72) 式より、モノケーブル方式の労務費単価 $P(L)$ (円/ m^3) は、

$$P(L) = w [k_6 \cdot \{2(1-\alpha)L + L_s\} / \alpha\beta L^2 \cdot V_i \times 10^{-4} + \alpha\beta L^2 / k_7 \cdot L_s + m \cdot T_L / V_i] \quad (4-73)$$

となり、 $\partial P(L) / \partial L_s = 0$ より、 $P(L)$ は、

$$L_s = \alpha\beta L^2 \times 10^{-2} \sqrt{V_i / k_6 \cdot k_7} \quad (4-74)$$

のとき、最小値

$$P_{\min}(L) = w [k_6 \cdot 2(1-\alpha) / \alpha\beta L V_i \times 10^{-4} + 2 \times 10^2 \sqrt{k_6 / k_7 \cdot V_i} + m \cdot T_L / V_i] \quad (4-75)$$

をとる。

モノケーブル方式では、標準器材費 RIG (円) として、

$$RIG = W_r \cdot L_s \quad (4-76)$$

ただし、

W_r : 循環索 1 m 当りワイヤロープおよびブロックの費用 (1 m 当り購入価格 ÷ 耐用数量) (円/ $m^2 \cdot m$)

を見込むものとする。

5 集材費用の算定

前節で導いた理論方程式から、具体的数値を用いて各集材方式の集材費用を算定することにする。使用した数値は一括して表 4-3 に示す。

(1) 架空線集材方式による皆伐作業

皆伐作業の場合、索張方式による作業能率のちがいは少ないものと思われるが、ここでは一

表 4-3 集材費用の算定に使用した数値

Table 4-3 Values used for estimation of skidding costs

	Skyline systems	Vehicles at the roadside		Tractors	Vehicles in the forest	Monorail	Mono-cable
		Large	Small				
P_s (1000yen)	2,500	6,000	2,500	6,000	2,500	700	1,300
CR_s	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	*	0.9
D_o	270	270	270	270	270	*	270
LY_s	5	5	3	6	3	*	5
M_s	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	*	0.75
MT_s	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	*	0.21
MY_s	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	*	0.065
FV_s	12	12	8	21	8	*	6
FC_s	100	100	140	100	140	140	100
e	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
RIG(1000yen)	1,000					*	
V_c	6,000					*	
k	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	*	0.9
V_t	0.65	0.65	0.3	5.1	3.0	0.45	0.02
							0.05
v_1, v_2					Off road		
	240×60	48×60	12×60	60×60	4000	80×60	
	180×60	21×60	30×60	60×60	4000	80×60	
					With spur roads		
					7000		
					9000		
v'_1, v'_2	*			12×60			
				12×60			
T_L (sec)					1200	225	35 ($V_t=0.02$)
	240	85	45	600			35×1.5(0.05)
T_U (sec)					800	79	
R (hr)		0.5	0.25				
m	3	3	3	3	*	3	3
w	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
T_{LU} (sec)				45			
V_{pt}				1.7			
r_t				1,000			
W_r/V_c							0.08

* See the text.

P_s , machine prices; CR_s , rate of depreciation; D_o , actual working days per year; LY_s , life of a machine (year); M_s , rate of regular maintenance; MT_s , rate of repair; MY_s , rate of annual management expenses; FV_s , fuel consumption (ℓ /day); FC_s , fuel prices (yen/ ℓ); e , oil and other

expenses/fuel expenses; RIG and V_c , wire rope and other implements expenses and their average life (m^3), respectively; k , actual working days per year/annual serving days; V_t , payload ($m^3/turn$); v_1 and v_2 , travel speed of going and returning (m/h); v'_1 and v'_2 , speed of lateral yarding or prehauling (m/h); T_L , loading time; T_U , unloading time; R , time of rigging and dismantling; m , crew size (men); w , wages (yen/man-hour); T_{LU} and V_{pt} , total time of loading and unloading of prehauling with a winch and its average payload (m^3), respectively; r_c , construction cost of spur roads (yen/m); W_r , cost of wire rope and blocks per unit mono-cable length (yen/ $m^3 \cdot m$)

般に普及しているダブルエンドレス式を想定する。

搬器走行速度は、ダブルエンドレス式の作業現場でスピードガンを用いて簡易実測した値を参考にして、 $v_1 = 240 \times 60m/時$ 、 $v_2 = 180 \times 60m/時$ とする(表4-4)。なお測定値はいずれも下げ木集材によるが、路網密度が $14m/ha$ 以上になると $500m$ の片側集材が可能となるので、ここでは下げ木集材の値を参考にする。 T_L 、 T_U は主索高や荷掛材積に大きく影響され、とくに L が小さいときにはサイクルタイムにおよぼす影響が大きいが一応 $T_{LU} = 240/3600時/回$ を想定する。

まず架線本数 n について試算してみる。架設撤去人工数に関わる係数は、筆者らの調査結果から⁴⁰⁾、 $k_1 = 0.1 \times 6$ 、 $k_2 = 0.25$ 、 $k_3 = 12.5 \times 6$ とする。横取速度 v'_1 、 v'_2 は、主索が沢筋のときは、横取方向が架線の左右いずれも下りになるが、主索が斜面中腹上に位置すると横取方向が上りと下りの両方向になるので、作業条件が複雑である。 $1/v'_1 + 1/v'_2$ を小山¹⁸⁾、森岡²⁹⁾の資料から評価すると、それぞれ $0.1667/60時/m$ 、 $0.0188/60時/m$ となり、差異が大きいため、ここではその中間値となる、筆者が静岡県下民有林における表4-4と同一現場で観測した上下両方向平均 $0.0685/60時/m$ を使用することにする。なお、このときの索張方式はエンドレスタイラー式であったが、荷掛フックの引込等はダブルエンドレス式にも転用しうるものとする。 m 、 V_n 、 V_t は筆者らによる全国のアンケート調査結果⁴⁴⁾から、平均的な数値とみなしうる $m = 3$ (人)、 $V_n = 350(m^3/ha)$ (人工林)、 $V_t = 0.65(m^3/回)$ とする。

以上の諸数値を(4-19)、(4-20)式の[]内の横取と張替に関する人工数に代入して扇形張替と魚骨形張替を比較すると、 L が $300m$ 以下では大きな差異がないが、 $300m$ 以上になると扇形張替の方がわずかに有利となるので、以下では扇形張替について考えることにする。

横取能率低下によって集材架線の張替を要するとき、すなわち $n \geq 2$ となることを調べると、扇形張替の場合 $L \geq 353m$ となる。このときの集材距離を路網密度に換算すると(IV-6-1)参照)、林内路網密度が約 $20m/ha$ 以上に整備された状態では横取能率低下による集材架線の張替は考えなくてもよいことになる。また上記路網密度に達していなくても、横取作業の範囲は架空索の高さによるものであり、その限界はサイクルタイムの影響によるよりも索張力によるところが大きいとする森岡²⁹⁾の知見や、皆伐作業において横取能率低下による張替が行われているのは非常に少なく、横取作業は伐区内の地形によるところが大きいというアンケート調

査結果(表4-1)から、横取能率低下による張替は考えないことにする。また図4-3からも、集材架線の張替は集材距離に対して伐区面積が過大の現場に多く、図4-1の伐区モデルに従う限りにおいては、 $n=1$ とみなすことができる。なお伐区面積が大きくなると、伐区内地形が複雑になる傾向があり⁴³⁾、それだけ張替を必要とする可能性も大きくなる。

したがって本論では、一応 $n=1$ とすることにす。このとき架空線集材方式の総所要人工数 T (人時)はあらたに、(4-6)、(4-7)、(4-14)式から、

$$T = k_1 \cdot (1 + k_2) L + m \cdot V_a \cdot C_v(L) / V_t \quad (4-77)$$

ただし、

$$C_v(L) = L (1/v_1 + 1/v_2) / 2 + T_{LU} + 0.4L (1/v_1' + 1/v_2') / 4 \quad (4-78)$$

$$V_a = 0.4L^2 \cdot V_n \times 10^{-4} \quad (4-79)$$

1伐区当り総出材量 (m³)

と簡略にすることができる。

このとき(4-78)式によるサイクルタイムから1日当り出材量を求めると、図4-5のようになる($V_t=0.65$)。この結果は、標準功程表⁵²⁾と比較することにより、妥当であることが確

表4-4 主索上搬器走行速度

Table 4-4 Velocity of carriage on skyline

(km/h)

Cable system	Iwate Univ. system	Double-endless system		
Experimental area	Experimental Forest of University of Tokyo in Chiba Pref. (Jan. 1981)	(Dec. 1980)	A private forest in Shizuoka Pref. (Sept. 1982)	
Slope of span	Vague	13°	10°	About 30°
Uphill with no load				
Tachometer		17.4(4)	17.8*(16)	
Radar	9.1	16.7(4)	17.3*(16)	
Actual measurement				13.8(32)
Downhill with load				
Tachometer		11.5(4)	12.1(15)	
Radar	4.6	11.1(4)	11.9(15)	
Actual measurement				13.4(32)
Average payload		0.75m ³	0.69m ³	0.67m ³
Conversion into level direction (radar)				
Uphill	9.1	16.3	17.0	11.3
Downhill	4.6	10.8	11.7	11.0

Actual velocity was measured by the time needed to pass the section.

*, Significant at 5% level

(), Number of samples

認される。この1日当り出材量に対して、集材費用 $f(L)$ (円/㎡) は、(4-12) 式より、

$$f(L) = 1.527L + 75000/L + 689 \quad (4-80)$$

となる (図4-6)。

(2) 架空線集材方式による間・択伐作業

k_1, k_2, k_3 を (4-23), (4-24) 式に代入して試算してみると、扇形張替の方が有利であり、とくに L が 200~300m 以上になるとこの傾向が一層強くなるので、間・択伐作業においても扇形張替についてのみ考えることにする。このとき (4-22), (4-23) 式から、総所要人工数 T (人時) は、

$$T = k_1 \cdot (1 + k_2) L + (\beta L / 2L_y - 1) k_3 + m \cdot \alpha \beta L^2 \cdot V_i \cdot C_y(L) \times 10^{-4} / V_i \quad (4-81)$$

となる。

間伐作業の1例として地形急峻な天竜地方スギ優良材生産における間伐について⁵⁰⁾ (表4-5) 試算してみる。まず表4-2から最大横取距離 L_y を求め、 V_i 以外は前記皆伐時と同一数値を用いると、 i 回目間伐時の1日当り出材量は図4-5のようになり、このときの集材費 $f_i(L)$ (円/㎡) は、(4-12) 式から、図4-6のようになる。

間伐作業では、各回間伐の L_y がそれほどちがわないので、1日当り出材量は大体同じである。なお皆伐作業のときは、集材架線の張替は行わないものとしているので、集材距離が長く

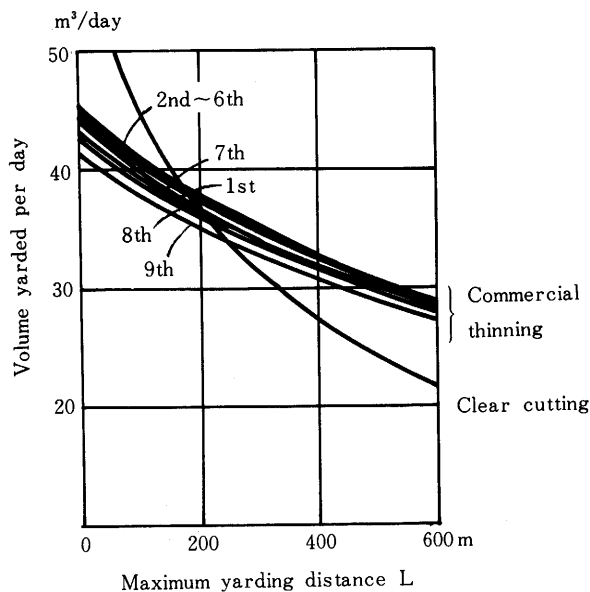


図4-5 架空線集材方式の1日当り出材量

Fig. 4-5 Volume yarded per day of skyline systems

なると横取距離が長くなるため、 L_y に応じて架線の張替をしている間伐作業の場合よりも1日当り出材量はかえっておちることになる。

間・択伐作業の集材費の理論式は、集材距離 L が大きくなるにつれてサイクルタイムが長くなる一方で、出材量も L に比例するので、 L が大きくなると 1m^2 当り架設撤去費が安くなり、結局は集材費が安くなる構造になっている。なお、(4-81)式において、扇形に張替えるときの張替人工数 k_3 の符号が負であるため、 L が約150m以下の集材費の曲線が現実の感覚からずれているかもしれない。しかし、 L が大きいところでは妥当な数値であり、飽和密度算定にあたっては L が大きいときが問題となるので、実用上はさしつかえない。皆伐作業は間伐作業よりも出材量が多いので、集材費用は皆伐作業の方が安い。ただし両者とも横取距離と出材量以外の作業因子を同一にしているのので、集材距離が大きくなると架設撤去費に対する出材量の影

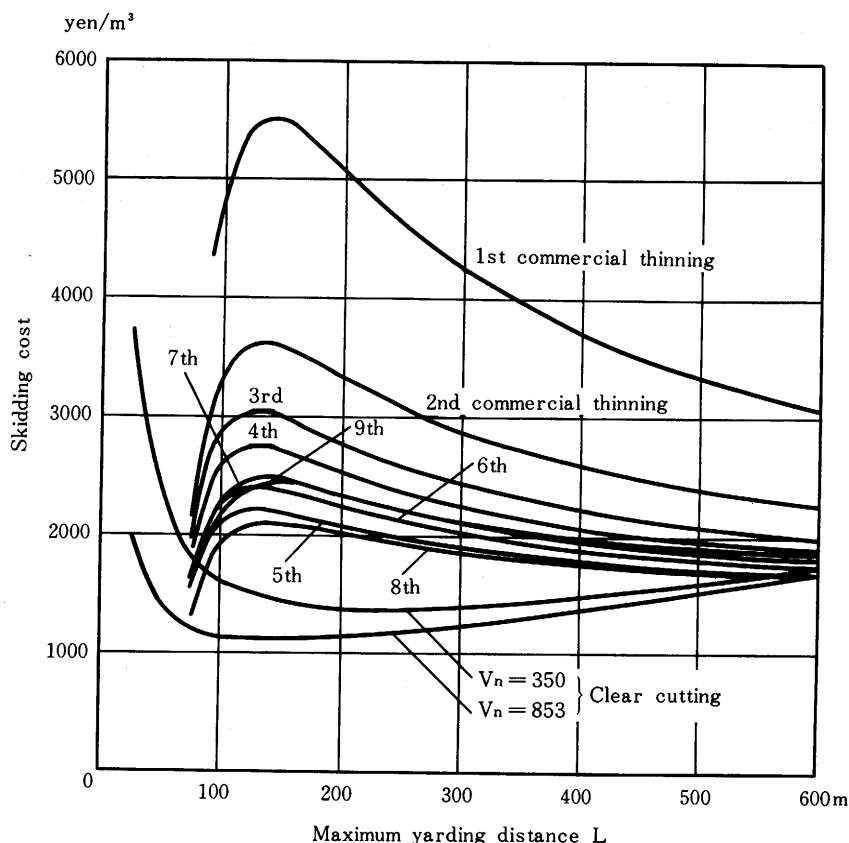


図 4-6 架空線集材方式の集材費用

Fig. 4-6 Skidding cost of skyline systems

V_n , harvested volume per hectare of clear cutting

響がほとんどなくなり、集材費は大体2000円/㎡に収束している。

(3) 駐車型車両集材

$P_s=6,000,000$ 円のタワー付き大型集材車と $P_s=2,500,000$ 円のクレーン付き小型集材車を

表 4-5 天竜地方スギ優良材生産技術指針

Table 4-5 A guide to making superior sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) stands in Tenryu area, Shizuoka Prefecture

Age	Brush cutting	Pruning	Fertilization	Thinning		Remaining stands	Tree height (m)	DBH (cm)	Stock volume (m ³)	Calculated maximum lateral yarding distance L_y (m)
				No.	Volume (m ³)					
1	Once		N,P,K			4000				
2	Twice		N,P,K							
3	Twice		N,P,K							
4	Once									
5	Once	3900		100		3900	5.0	6.0		89
7	Vine cutting									
8		3800		100		3800	7.0	8.0		60
11		3300	N,P,K	200		3600	9.0	10.0		45
13				300		3300	9.8	11.0		43
14		1600	N,P,K				10.5	12.0		
15~16				500	32	2800	11.3	13.0	224	41
17		1600	N				12.0	14.0		
19~21				500	58	2300	14.0	16.0	336	37
22	Cleaning cutting		N,P,K							
25~26				400	80	1900	16.0	20.0	479	33
27			N							
29~30				300	92	1600	18.0	23.0	589	33
31	Cleaning cutting		N							
33			N							
35				300	126	1300	20.5	26.0	683	35
40	Cleaning cutting			200	110	1100	22.0	29.0	759	36
45				150	99	950	23.4	31.0	785	39
50				150	123	800	24.6	34.0	819	43
55				100	92	700	25.6	35.5	808	48
60						0	26.4	36.0	853	
Total					812				853	

First productivity class, per hectare

Quoted from (50).

想定する。駐車型車両集材は伐区幅，すなわち横取距離に対する集材上の制約が少なく，短距離集材に適しているので，とくに皆伐と間・択伐の違いは考えないが，車両の大きさから一応大型集材車を皆伐用，小型集材車を間・択伐用とする。

この作業方式はわが国においては実績が少ないが，諸数値は，大型集材車は宮崎県下民有林，小型集材車は群馬県下民有林における作業現場から収集した（1982）。（4-25）式による1日当り出材量は図4-7のようになる。なお，大型集材車の1荷当り集材量は荷掛能率を考慮して架空線集材と同一にした。このときの集材費用は，

i) タワー付き大型集材車

$$f(L) = 3.55L + 52500000 / V_n \cdot L^2 + 292 \quad (4-82)$$

ii) クレーン付き小型集材車

$$f(L) = 17.65L + 26250000 / V_t \cdot L^2 + 227 \quad (4-83)$$

となり，図4-8のようになる。

図4-7，8より，駐車型車両集材はLの影響を大きく受けるが，Lが約120m以下ならば，他の集材方式に比べて非常に高能率であることが確かめられる。また，Rが小さいために，Lが50~100m以上になると集材費は出材量の影響をほとんど受けなくなる。タワー付き集材車は小型集材車両の付属クレーンよりも V_t ， v_1 ， v_2 が有利であるため，Lが大きくなると両者の集材費の差が開いてくる。

(4) トラクタによる全幹材集材

資料は，秋田営林局管内および北海道民有林から収集した（1984，1985）。トラクタ集材は，集材距離が長くなると，1回当り積載量を多くして作業能率を維持する傾向があるが，土場での待ち時間も長くなるので，路網が高密になることを前提として長距離集材は考えないことにする。

$\eta_k = 0.4$ ， $V_{pt} = 1.7$ ， $V_n = 350$ ， $r_t = 1000$ ， $\tan\theta / \sin\phi = 1.3$ とすると， $d_t = 95.5$ となり，

$$f(L) = 0.591L + 868 \quad (4-84)$$

となる（図4-8）。このときの平均木寄距離は37mで，（4-38）式による1日当り出材量は図4-7のようになり，標準功程表⁶²⁾にも大体一致する。図4-8より，トラクタ集材は地曳方式によって積載量が多いので，集材費が安く，しかも集材距離の影響が少ないことが確かめられる。

(5) 載荷式車両集材

集材用車両は駐車型車両集材の場合と同一のクレーン付き小型集材車を想定する。伐区外走行は，専用作業路を走行するものとして $v_{1s} = 7000$ ， $v_{2s} = 9000\text{m}/\text{時}$ とすれば， $(1 - \alpha)(1 + \eta_s)L$ を走行する費用は，100mにつき22円/ m^2 にしかならないので，一般には C_{ts} を無視することができる。

いま $\alpha = 1$ とすると、1日当り出材量は図4-7のようになり、小型運材車の標準功程⁵²⁾に大体一致する。ただし、あらかじめ木寄する場合の1日当り出材量は、木寄人員数によって異なってくるので、図中では木寄作業は考慮していない。また、集材費は図4-8のようになる。木寄と集材を並行して行う場合とあらかじめ木寄しておく場合とでは、労務費は共通であるが（(4-47)式）、機械費算定のためのサイクルタイムが異なるので、どちらが有利かは V_p によって異なる。図4-8では、 $V_p = 2$ ではあらかじめ木寄しておく方が有利であるが、 V_p が3以上になると、わずかに並行作業の方が有利になる。しかし、両者に顕著な差異はない。木寄と集材を並行して行う場合の平均木寄能率を $V_p = 3 \text{ m}^3/\text{人時}$ としたとき、集材費は、

$$f(L) = 0.236L + 1275 \quad (4-85)$$

となる。

なお、木寄と集材を並行する場合の1日当り出材量は後記のモノレール作業にほぼ等しいが（図4-10）、モノレールはレールの架設撤去を必要とし、荷卸場にも作業員を固定しておくなければならないので、集材費は本方式の方が安くなる（図4-11）。

(6) 専用作業路を利用した車両集材

載荷式車両集材の場合と同一の集材車両を使用するものとする。1日当り出材量および集材費は図4-7、8のようになる。ただし、あらかじめ木寄する場合の1日当り出材量は、載荷式車両集材の場合と同様、木寄作業は考慮していない。木寄と集材を並行して行う場合、 $V_p \geq 3.9$ のときのサイクルタイムは、(4-53)式による。

木寄と集材を並行して行う場合とあらかじめ木寄しておく場合の集材費は、大差はないが、木寄と集材を並行して行う場合の平均木寄能率を(4-85)式よりも割引いて $V_p = 2 \text{ m}^3/\text{人時}$ としたとき、集材費は、

$$f(L) = 0.108L + 1446 \quad (4-86)$$

となる。上式は平均サイクルタイムを基にしているもので、専用作業路の走行に関する費用は、係数0.108を2倍することにより、載荷式集材の場合の専用作業路走行と同様100mにつき22円/ m^3 となり、ほとんどが木寄と積込、荷卸作業に関する費用であることがわかる。

本方式と載荷式車両集材を比較すると、同じ木寄能率では走行速度の速い専用作業路を利用した方が有利であるが、載荷式車両集材による林内自由走行では V_p が大きくなるので、これに専用作業路の開設費および維持管理費も含めると、載荷式車両集材の方が有利ではある。

(7) モノレール

(4-62)式の林内木寄能率 V_p において、 v_{1d} は林地傾斜と、林地と材との動摩擦係数、および木寄材積 V_{pd} によって求められる材のけん引力 F_p (kg) との間に、

$$F_p = 42.42 - 1.47v_{1d} \quad (4-87)$$

の関係を想定することができ⁴⁶⁾、人力木寄における限界けん引力 F_m (kg) は14~16kg程度であ

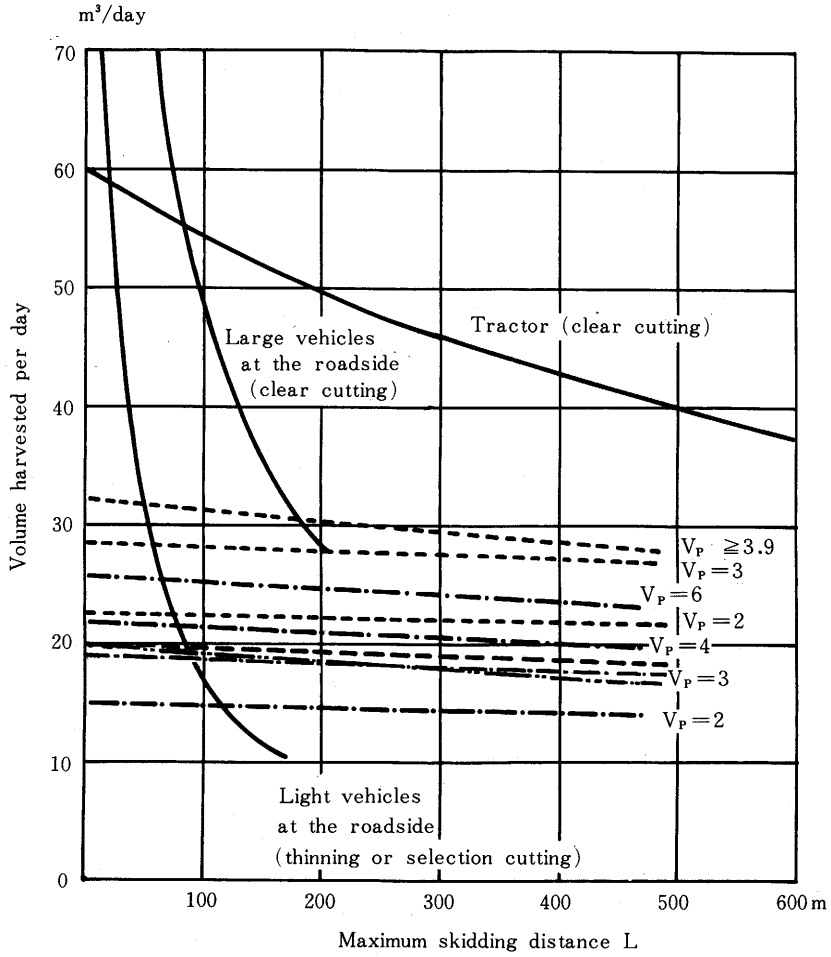


図4-7 車両系集材方式の1日当り出材量

Fig. 4-7 Volume harvested per day by vehicles for skidding

- Light vehicles with spur roads (thinning or selection cutting, simultaneous prehauling)
 - Light vehicles with spur roads (thinning or selection cutting, after prehauling)
 - Light forwarders (thinning or selection cutting, simultaneous prehauling)
 - Light forwarders (thinning or selection cutting, after prehauling)
- V_p , operational efficiency of prehauling ($m^3/man-hr$)

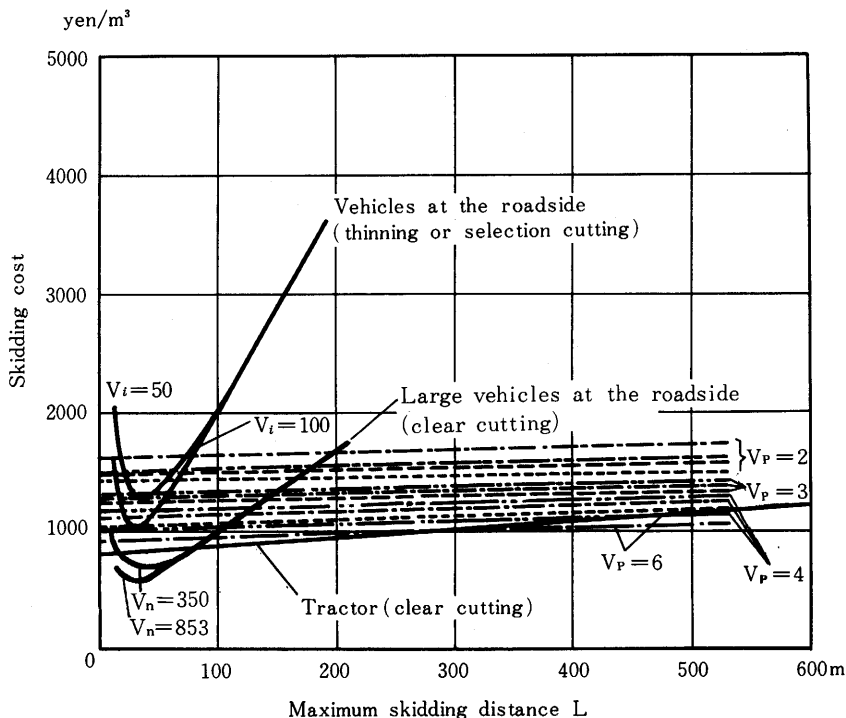


図 4-8 車両系集材方式の集材費用

Fig. 4-8 Skidding cost of vehicles used for logging

Lines are the same as in Fig. 4-7.

V_p , operational efficiency of prehauling (m³/man-hr);

V_n , volume harvested (m³/ha)

る。しかし林地傾斜 θ が大きくなると、 F_p が F_m (kg) よりも小さくなるので、木寄能率は F_p の影響を受けなくなり、向上する。図 4-9 はこれらの計算例を示したものであるが⁴⁶⁾、人力木寄以外にも、木寄用ウィンチによる木寄能率も示す。図 4-9 よりモノレールの路線間隔に対する木寄能率を知ることができるが、ここでは木寄能率 V_p が 1, 2, 3, 4m³/人時の作業現場を想定することにする。

モノレール作業の諸数値は、東京大学千葉および秩父演習林で作業試験を行ったときの数値を使用することにする⁴²⁾。このときの 1 日当り出材量は (4-66)、(4-68) 式のサイクルタイムに対して図 4-10 のようになり、他の事例⁵²⁾にも一致する。

モノレールの機械損料は実績が少ないが、次式によるものとする。

$$1 \text{ m}^3 \text{ 当り機械損料} = P_s \cdot M_a \cdot C_t / V_t \quad (4-88)$$

ただし、

M_a : 全損料率。ハンドトラクタと同程度の 389×10^{-6} とする⁵²⁾。
燃料消費量を ρ ($=1500 \text{ m} / \ell$)⁴²⁾ とすれば、(4-9) 式の $F_u(L)$ は、

$$F_u(L) = 2L \cdot FC_s \cdot (1 + e) / \rho \cdot V_t \quad (4-89)$$

ただし、

$e : 0.2$ とする

となる。

(4-10) 式に相当するレール費は、

$$1 \text{ m}^3 \text{ 当りレール費} = L \cdot P_r / V_c (=K) \quad (4-90)$$

ただし、

P_r : レール価格。3000円/m とする。

V_c : 耐用数量。18,000m とする。

とする。

このとき、(4-69) 式の労務費を加えてモノレール方式の集材費は、 V_p に応じて図 4-11 のようになる。機関車の運行と木寄作業を組合せることが重要なモノレール作業では、木寄能率が高い方が良い結果となっている。(4-86) 式と同様 $V_p = 2$ のときは、

$$f(L) = \begin{cases} 0.664L + 2439 & (L \leq 217) \\ 2.734L + 97800/L + 1539 & (L \geq 217) \end{cases} \quad (4-91)$$

となる。

(8) モノケーブル方式

モノケーブル方式の数値は、三重県下民有林の筆者らの調査(1977, 1983)に基づいた。1日当り出材量は、(4-72) 式より図 4-10 のようになり、他の事例⁵²⁾にも大体一致する。 $k_6 = 0.09$ とし、林内人力木寄は図 4-9 より $k_7 = 93.9$ とすると、このときの集材費用は、(4-75) 式より、 $T_L = 35/3600$, $V_t = 0.02$, $V_i = 50$ のとき、

$$f(L) = 3131 + 0.00055L^2 \quad (4-92)$$

また、 $T_L = 35 \times 1.5 / 3600$, $V_t = 0.05$, $V_i = 100$ のとき、

$$f(L) = 1972 + 0.00078L^2 \quad (4-93)$$

となり(図 4-11), L に対して非常に緩慢な増加を示す。機械費・燃料費は $130 \sim 220$ 円/m³ で、労務費が大半をしめており、労務費のうち、荷掛作業に関する部分と木寄作業・架設撤去作業に関する部分の比は約 2 : 1 である。

なおモノケーブル方式では、IV-4-4) に示した架線配置の他にも、伐区周囲の小谷沿に循環索を架設する方法もあるが、この場合、

$$L_s = 2 (\alpha + \beta) (1 + \eta_s) L \quad (4-94)$$

ただし,

η_s : 循環索の屈曲率

となり, $L \leq 550 \sim 650$ では, (4-74) 式による L_s と大差がない。

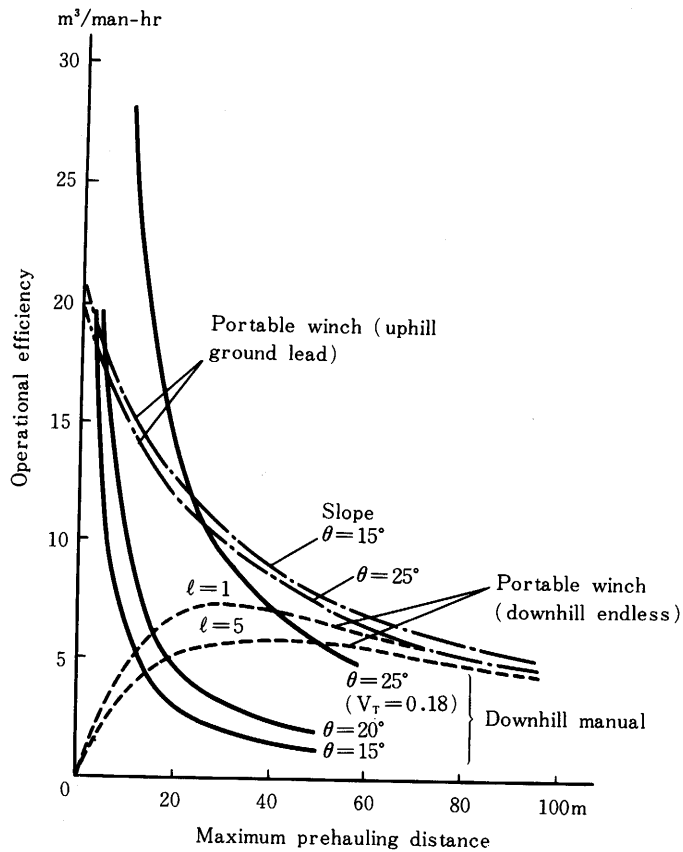


図 4-9 各木寄方式の作業能率

Fig. 4-9 Operational efficiency of the prehauling-systems

θ , slope; l , number of rows of planted trees to be prehauled per rigging; V_T , volume of logs (m³)

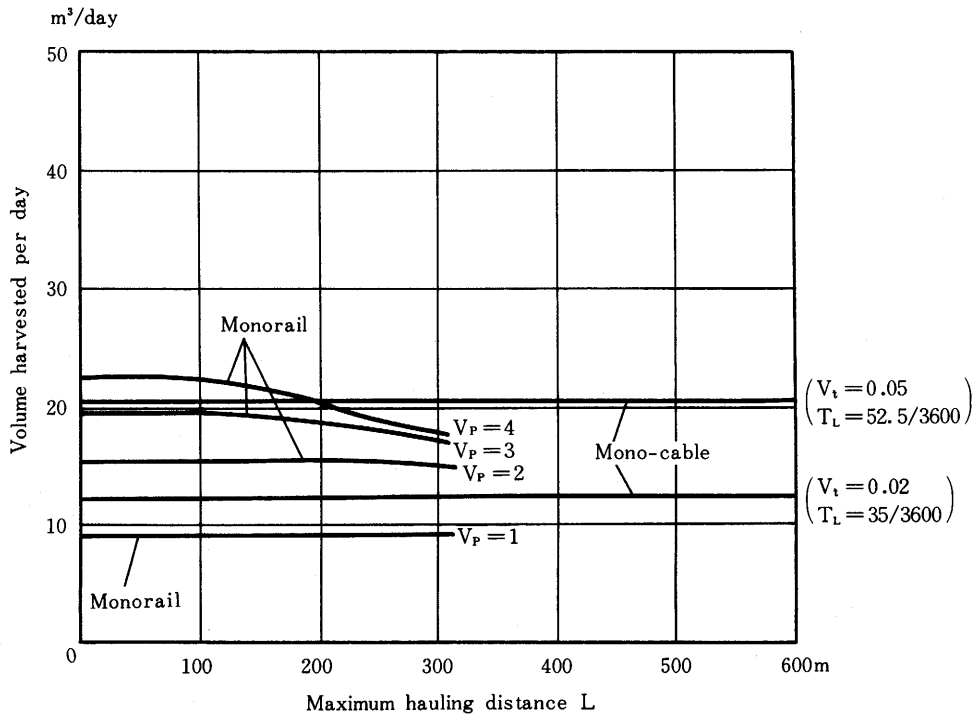


図 4-10 モノレール、モノケーブル方式の 1 日当り出材量

Fig. 4-10 Volume harvested per day by monorail and mono-cable systems

V_p , average operational efficiency of prehauling ($m^3/man-hr$);

V_t , average payload (m^3); T_L , loading time (hr)

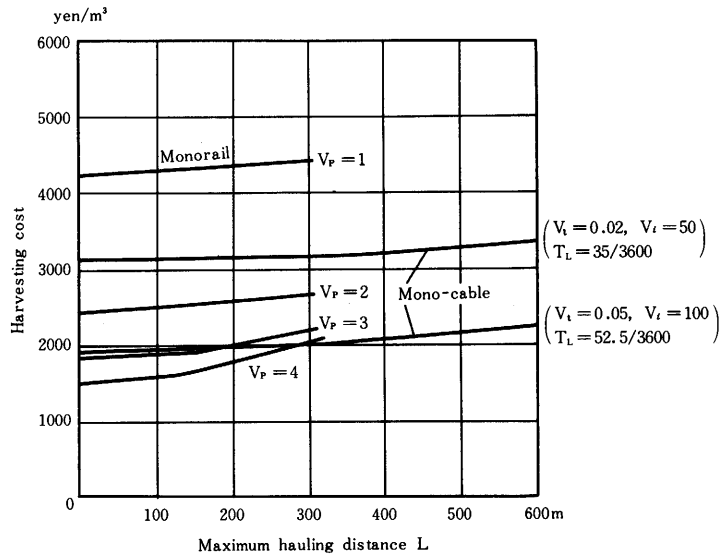


図 4-11 モノレール，モノケーブル方式の集材費用

Fig. 4-11 Harvesting cost of monorail and mono-cable systems

V_p , average operational efficiency of prehauling ($m^3/man-hr$);

V_t , average payload (m^3); T_L , loading time (hr); V_h , volume harvested (m^3/ha)

6 飽和密度の算定

1) 林内路網密度と集材距離の換算

IV-4 の理論方程式による集材費用を路網密度に対する集材費用として用いるためには，集材距離と路網密度の換算を正確に行う必要がある。

従来の換算方法として，まず平賀³⁾は小川^{6,7)}の林地モデル(図 4-12)を利用して，林道密度 d (m/ha) と平均集材距離 S_m (m) の関係について，次式を導びいた。

$$S_m = A (\sqrt{d^2 + 10^4/A} - d) / 2 \quad (4-95)$$

ただし，

A : 対象面積 (ha)

同じく南方²⁴⁾は小川の林地モデルに開発伸長効率 k の概念を導入して次式を導びき， S_m の精度をあげている。

$$S_m = 2k \cdot A \left(\sqrt{d^2 + 10^4 \pi / 4k^2 A} - d \right) / \pi \quad (4-96)$$

(4-95)式では林道を直線としているため、実際の平均集材距離に比べて S_m が過小になる傾向がある(V-3参照)。一方、(4-96)式は精度は高いが、溪床勾配や山腹褶曲率から開発伸長効率を求めなければならない。現在は迂回率の概念が一般には普及しているので、(4-95)式に迂回率 η を導入することにする。このとき(4-95)式は、

$$S_m = A \left(\sqrt{d^2 + (1 + \eta)^2 10^4 / A} - d \right) / 2 (1 + \eta) \quad (4-97)$$

となる。V-3で後記するように $\eta = 0.3 \sim 0.4$ としたとき、実際に測定した平均集材距離に対する(4-97)式の適合性は高い(表5-2)。

さて(4-97)式は d について解くと、

$$d = 2500 (1 + \eta) / S_m - S_m (1 + \eta) / A \quad (4-98)$$

となる。(4-98)式は S_m が160~200m以下、かつ対象面積 A が S_m (ha)以上であれば、第2項は無視することができ、従来よく用いられている矩形モデルの簡易な換算式、

$$S_m = 2500 (1 + \eta) / d \quad (4-99)$$

と同等になり、路網が高密度で対象面積が大きければ、(4-99)式でも実用上は十分である⁴¹⁾。したがって本論では、集材距離と路網密度の換算に(4-99)式を用いることにする。

なお(4-99)式は、実際の η が大きかったり、効率の悪い路網配置であると、適合性は悪くなる。この場合(4-99)式を適合せしめる η をあらたに対象林地の総合迂回率として定義することもできる。

また(4-13)、(4-99)式より、高密度路網によって伐区が林道に接する状態では、林道密度 d に対する伐区面積 S (ha)は、

$$S = 1000 (1 + \eta)^2 / d^2 \quad (4-100)$$

となり、20~30m/haの飽和密度に対して2~5 haの小面積伐区作業が可能となることが確かめられる。

2) 総合集材費および飽和密度の算定

森林利用学的地形分類¹²⁾に従って、急峻、急、緩、平坦の4地形を想定し、IV-5で得られた各集材方式の集材費に対して、(4-3)式から間伐、皆伐作業の総合集材費 C (円/m²)を算定し、これに林道維持費を加えて飽和密度を求めると、図4-13が得られる。なお施業は表4

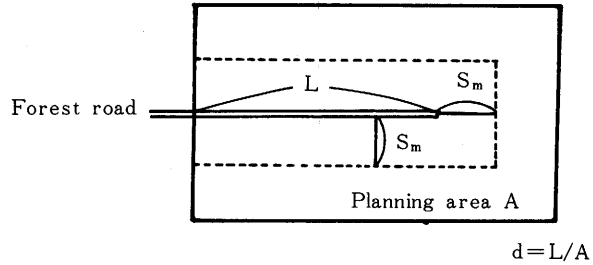


図4-12 林地モデル

Fig. 4-12 A model of planning area

—5をモデルとした。

i) 急峻地形における間伐, 皆伐作業 (図4-13(a))

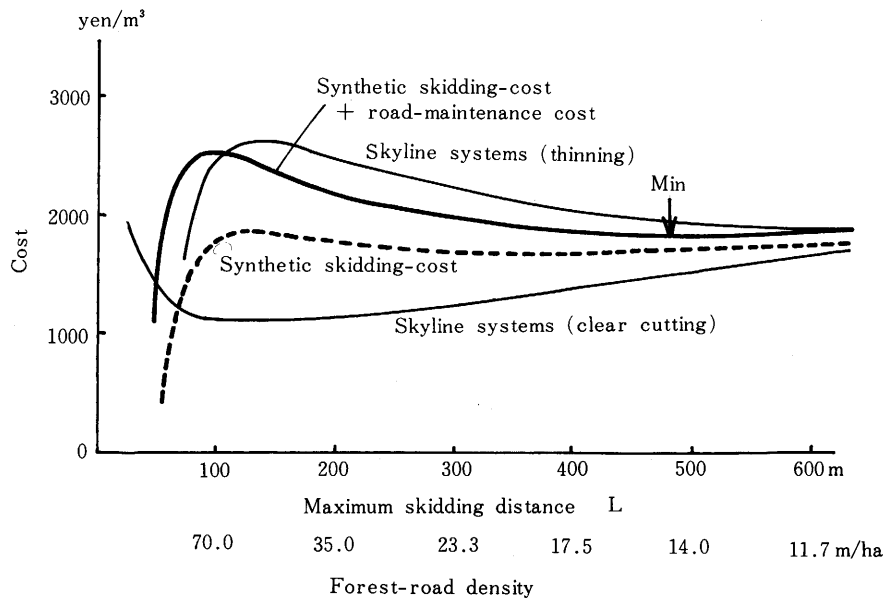


図4-13 総合集材費と飽和密度

Fig. 4-13 Synthetic skidding-cost and saturated road-density
 r_{yn} , forest-road maintenance cost (yen/m·yr); V_t , volume harvested (m^3/ha)

(a) 急峻地形における間伐, 皆伐作業

Commercial thinning and clear cutting on very steep slopes

集材方式は間伐, 皆伐作業いずれも架空線集材方式とする。間伐作業の集材費は図4-6から出材量に応じて合成した結果,

$$F(L) = 0.634L + 445000/L - 29100000/L^2 + 860 \quad (4-101)$$

となり, 総合集材費は,

$$C(L) = 1.092L + 233000/L - 14200000/L^2 + 772 \quad (4-102)$$

となる。施業団地の1 ha 当り年間平均出材量 $1665/60 m^3/年 ha$ (表4-5) に対して最低規格の林道維持費 r_{yn} を仮に $300円/年 m$ とし, 急峻ないし急地形の林道迂回率 η を 0.4 とすれば, 林道費 $R(L)$ ($円/m^2$) は, (4-99) 式から林道密度を L に換算することによって,

$$R(L) = 300 \times 5000 \times 1.4 \times (60/1665) / L \quad (4-103)$$

となる。これを (4-102) 式の総合集材費に加えると, $L=478$ のとき費用最小 ($1877円/m^2$) となり, このときの林道密度がすなわち飽和密度 D (m/ha) となる。(4-99) 式によれば, $D=14.6$ であり, 林道間隔は $956m$ となる。

ii) 急地形における間伐、皆伐作業 (図4-13(b))

集材方式は架空線集材方式のほかに、駐車型車両集材方式や、モノレール、モノケーブル方式による間伐作業を想定する。

厳密には各回間伐の集材費を算定しなければならないが、一応図4-6, 8, 11等の算定結果で代表させることにする。

総合集材費は、

$$C(L) = \begin{cases} 12.226L + 160000/L^2 + 261 & (L \leq 98) \\ 3.617L + 31500/L^2 + 0.0038L^2 + 1111 & (98 \leq L \leq 118) \\ 0.782L + 0.00038L^2 + 15800/L + 1315 & (118 \leq L \leq 373) \\ 1.091L + 233000/L - 14200000/L^2 + 772 & (373 \leq L) \end{cases} \quad (4-104)$$

となり、間伐作業の場合は、駐車型車両集材方式、モノケーブル方式、架空線集材方式、皆伐作業の場合は、駐車型車両集材方式、架空線集材方式と、集材距離に応じて集材方式を選択していくことになり、集材方式の選択が多様である。

最低規格林道の年間維持費 r_{yn} を250円/m とすれば、 $L=281$ すなわち $D=24.9\text{m/ha}$ のとき、林道維持費も含めた集材費用は最小値1845円/m² となり、このときの集材方式は架空線集材方式とモノケーブル方式となる。ただし図4-13(b)より、 L が200m 以上になると総合集材費は L に対してほとんど変化しなくなるので、 D の許容範囲は広いことがわかる。

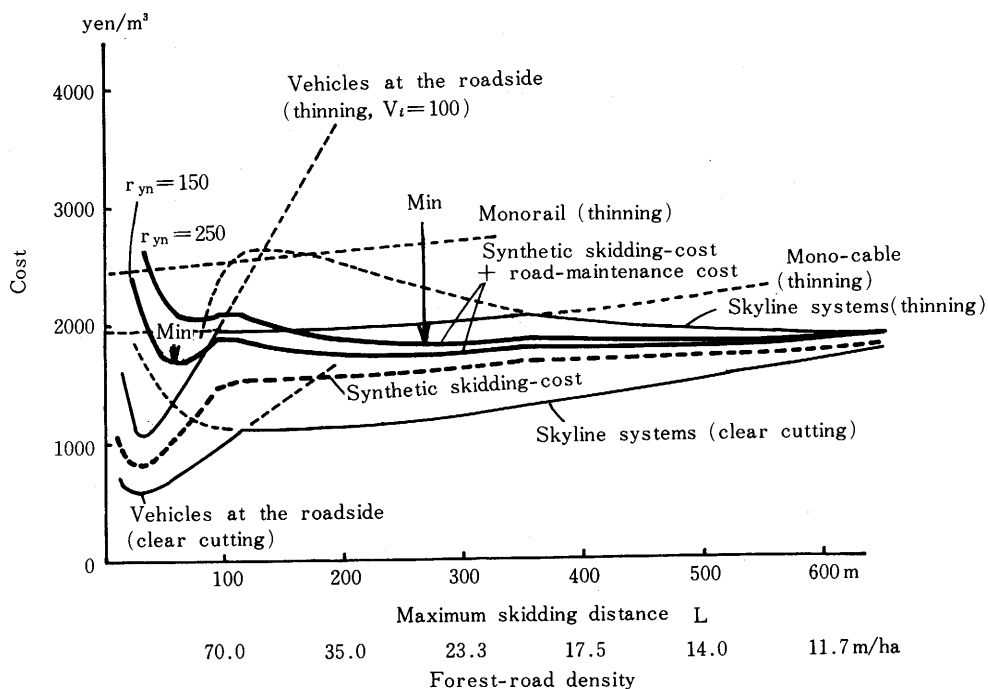
この地形条件において、年間林道維持費が約200円/年 m 以下になると、 $L \leq 98$ において費用最小が実現し、駐車型車両集材のみによる集材作業が可能となる。このときの飽和密度および林道維持費も含めた最小集材費は、104m/ha ($L=67$)、1866円/m² である。さらに年間林道維持費が150円/年 m になると、それぞれ119m/ha ($L=59$)、1669円/m² となる。このように林道費用が安ければ飽和密度は飛躍的に増大し、高度な機械化作業が可能となる。ただし、この場合には L に対する集材費の傾きが大きくなり、飽和密度も高くなるので、なるべく正確な林道費用に基づいて計画精度をあげなければならない。

iii) 緩地形における間伐、皆伐作業 (図4-13(c))

総合集材費は、

$$C(L) = \begin{cases} 12.226L + 160000/L^2 + 261 & (L \leq 88) \\ 8.911L + 128000/L^2 + 555 & (88 \leq L \leq 90) \\ 0.355L + 1345 & (90 \leq L) \end{cases} \quad (4-105)$$

となり、間伐作業では駐車型車両集材方式と専用作業路を利用した車両集材方式が、皆伐作業では駐車型車両集材方式とトラクタ全幹集材が中心となる。専用作業路を利用する車両集材では、間伐対象林の状況に応じて10~25m/ha の専用作業路を必要とするが、この費用として、ここでは400円/m² を見込むことにした (VI-2) 参照)。



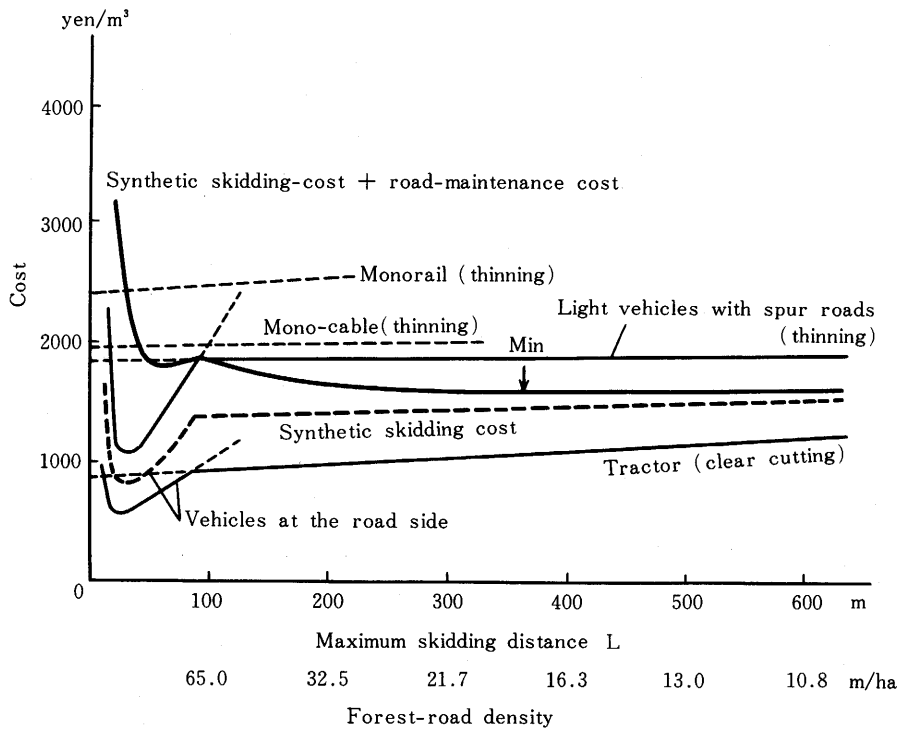
(b) 急地形における間伐、皆伐作業
Commercial thinning and clear cutting at steep slopes

最低規格林道の年間維持費 r_{yn} を200円/年 m とし、緩地形ないし平坦地形では林道迂回率 η を0.3とすると、飽和密度 D および林道維持費も含めた最小集材費は 17.9m/ha ($L=364$)、 1603円/m^3 となる。車両集材の集材費が集材距離にそれほど影響されないため、飽和密度はかえって急地形よりも少なくなるが、この場合も急地形と同様、 D の許容範囲は広い (図4-13(c))。

なお (4-105) 式の総合集材費による場合、年間林道維持費が例えば100円/年 m のとき、 $L \leq 88$ において費用最小が実現し、飽和密度は 133m/ha ($L=49$) となり、駐車型車両集材のみによる集材作業が可能となり、専用作業路は不要となる。しかし、この試算では専用作業路の費用もさらに安いはずであり、専用作業路の費用が200円/m³ ならば飽和密度は 133m/ha であるが、100円/m³ では飽和密度は 25.3m/ha となり、専用作業路による集材となる。

また、(4-86) 式と (4-93) 式を比較すると、専用作業路の費用が540円/m³ 以上になるとモノケーブル方式の方が専用作業路を利用する車両集材よりも有利になる。この場合の総合集材費は、

$$C(L) = \begin{cases} 12.226L + 160000/L^2 + 261 & (L \leq 88) \\ 8.911L + 128000/L^2 + 555 & (88 \leq L \leq 97) \\ 0.303L + 0.00038L^2 + 1406 & (97 \leq L) \end{cases} \quad (4-106)$$



(c) 緩地形における間伐，皆伐作業
Commercial thinning and clear cutting on gentle sloping slopes

となり，間伐作業では $L = 97$ を境に駐車型車両集材方式とモノケーブル方式になる。最低規格林道の年間維持費 r_{yn} を 200 円/年 m とすると，飽和密度 D および林道維持費も含めた最小集材費は $21.8m/ha$ ($L = 298$)， 1687 円/ m^3 となり，(4-105) 式に比べて飽和密度は微増する。さらに年間林道維持費が 150 円/年 m になると，飽和密度は $112m/ha$ ($L = 58$) となり，駐車型車両集材のみによる集材作業が可能となる。しかし，林道の条件が良い場合には元来専用作業路の費用も安いはずであり，モノケーブル方式や駐車型車両集材の採用を検討する以前に，専用作業路による車両集材となる可能性が大きい。

iv) 平坦地形における間伐，皆伐作業 (図 4-13(d))

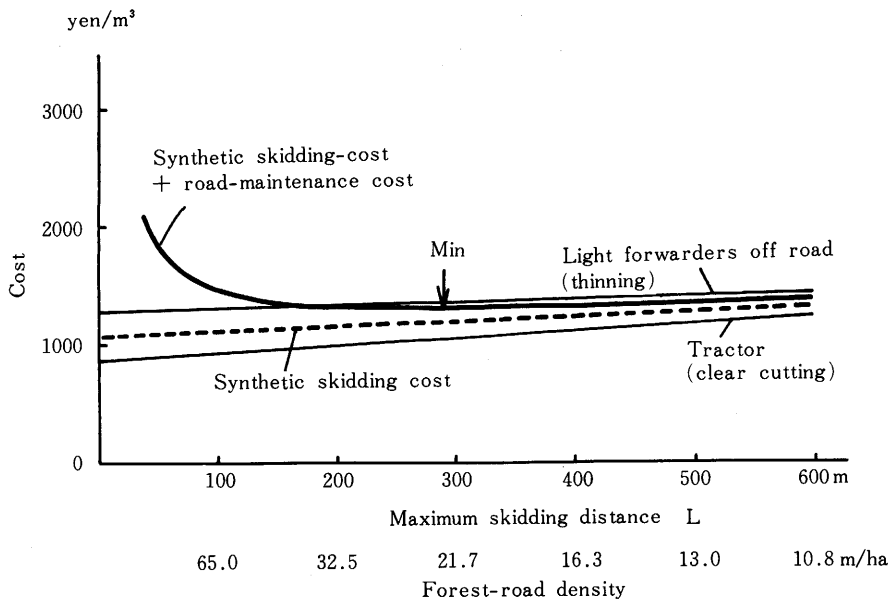
集材用車両が林内を自由走行できるものとして，間伐作業は小型集材車両による載荷式集材方式を，皆伐作業はトラクタ全幹集材を想定する。

このときの総合集材費は，

$$C(L) = 0.418L + 1066 \tag{4-107}$$

となる。

最低規格林道の年間費用 r_{yn} を 150 円/年 m とすれば，飽和密度 D および林道維持費も含めた



(d) 平坦地形における間伐、皆伐作業
Commercial thinning and clear cutting on flat terrain

最小集材費は22.4m/ha (L=290), 1308円/m²となり, 他の地形条件の7~8割の費用である。林内走行によって高能率な省力作業が行えるため, 地形条件がよいにもかかわらず飽和密度はそれほど高くないが, この場合もDの許容範囲は非常に広い。

v) 択伐作業 (図4-13(e))

上記4地形において択伐作業を想定すると, 林道維持費も含めた集材費用は図4-13(e)のようになる。なお, 集材方式は間伐作業と同一のものとし, 架空線集材方式による択伐作業では図4-6の第9回間伐で代用した。このときの総合集材費C (円/m²), 飽和密度D (m/ha) および林道維持費も含めた最小集材費は以下のとおりである。

i) 急峻地形

$$C(L) = 0.634L + 404000/L - 28500000/L^2 + 903 \quad (4-108)$$

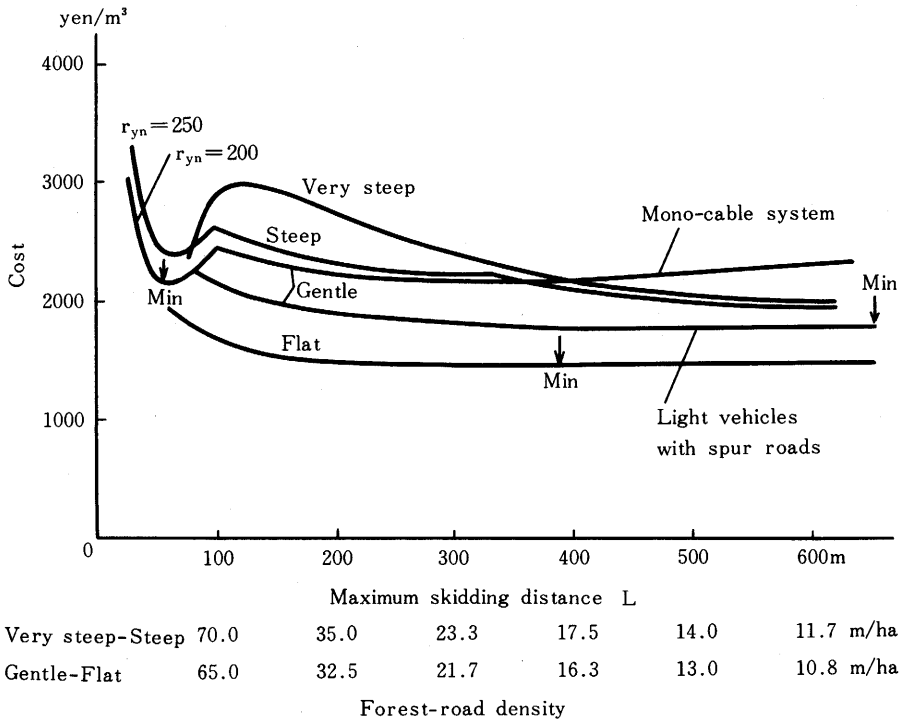
$$r_{yn} = 300 \text{円/年mのとき, } D = 8.7 \text{m/ha (L=803), } 1965 \text{円/m}^2$$

ii) 急地形

$$C(L) = \begin{cases} 17.651L + 263000/L^2 + 227 & (L \leq 98) \\ 0.00078L^2 + 1972 & (98 \leq L \leq 339) \\ 0.634L + 404000/L - 28500000/L^2 + 903 & (339 \leq L) \end{cases} \quad (4-109)$$

$$r_{yn} = 250 \text{のとき, } D = 8.9 \text{ (L=789), } 1950 \text{円/m}^2$$

$$r_{yn} = 150 \text{のとき, } D = 9.2 \text{ (L=761), } 1917 \text{円/m}^2$$



(e) 択伐作業 (総合集材費+林道維持費)
 Selection cutting (Synthetic skidding-cost+forest-road maintenance cost)

なお、飽和密度を130m/ha以上にして駐車型車両集材主体の集材方式ができないこともないが、林道費用が非常に安くないと、林道の過剰投資となるおそれがある。

iii) 緩地形

駐車型車両集材と専用作業路による車両集材を想定する場合、専用作業路の費用が200円/m²のとき、

$$C(L) = \begin{cases} 17.651L + 263000/L^2 + 227 & (L \leq 78) \\ 0.108L + 1646 & (78 \leq L) \end{cases} \quad (4-110)$$

$r_{yn} = 200$ のとき、 $D = 9.9$ ($L = 659$)、1788円/m²

この場合、飽和密度に加えて車両集材のための専用作業路を主体とした林内路網が形成され、林道は運材機能としての役割が高くなる。択伐作業の作業路密度は、(間伐回数)/(伐期齢) = 1/(回帰年)と置換えることによって間伐作業に準じて求めることができ(VI-2参照)、間伐作業の作業路密度を援用することにすれば、10~25m/haとなる。

また、駐車型車両集材とモノケーブル方式を想定する場合、

$$C(L) = \begin{cases} 17.651L + 263000/L^2 + 227 & (L \leq 97) \\ 0.00078L^2 + 1972 & (97 \leq L) \end{cases} \quad (4-111)$$

$$r_{yn}=200\text{のとき, } D=116 \text{ (} L=56\text{), } 2136\text{円}/\text{m}^2$$

しかるにこのように専用作業路の費用が高くてモノケーブル方式による択伐作業を図ろうとするならば、駐車型車両集材のみによる集材方式が有利となり、飽和密度は飛躍的に増加する。

iv) 平坦地形

$$C(L)=0.236L+1275 \quad (4-112)$$

$$r_{yn}=150\text{のとき, } D=16.8 \text{ (} L=386\text{), } 1457\text{円}/\text{m}^2$$

総じて図4-13より、皆伐作業も択伐作業も地形が急になるにつれて総合集材費が高くなっているが、択伐作業は皆伐作業よりもさらに集材費が高い。また、択伐作業の集材費は傾きが小さいので、飽和密度の計算値は一部を除いて皆伐作業よりも小さいが、そのかわり飽和密度の許容範囲が非常に広いので、実際には林地の状況に応じて柔軟に対処することができる。

3) 考 察

試算の結果得られた飽和密度および集材方式を、従来の成果¹²⁾と比較すると表4-6のようになる。急地形では架空線集材方式を中心に駐車型車両集材方式、モノケーブル方式等の多様な集材方式が使用できるので、架空線集材方式を前提とする従来の林道密度よりも高くなる。緩地形の択伐作業や急地形の間伐・皆伐作業では、駐車型車両集材を導入することも可能であり、その場合には飽和密度は100~120m/haとなる。平坦地では、車両系集材方式が集材距離にそれほど影響されないので、トラック集材を前提とした従来の林道密度よりも少なめになっている。飽和密度によって、高密路網を前提とする駐車型車両集材の可能性が明らかになったが、いずれの地形においても、飽和密度は概して従来の常識的な線にのっているものとみなすことができ、飽和密度による林道とはいっても集材機能や運材機能といった林道としての最低の機能は満たしているものであり、従来の林道密度が過剰規格でない普通林道に基づいていることを考えると、飽和密度の数値そのものに関しては従来の成果に合致しているものと考えることができる。

駐車型車両集材方式を除くほとんどの集材方式は集材距離Lに対する集材費の増加は緩慢であり、集材距離に応じて集材費最小となる集材方式を選択していく総合集材費は、いずれの地形の場合にもLがだいたい100m以上になると、集材距離に対してほとんど変化しなくなる。したがって、高密な林道を必要とする駐車型車両集材方式を中心に計画する場合を除いては、飽和密度Dの許容範囲が広い。

この点に関しては、集材費が集材距離に比例し、これに応じた最適密度を正確に求めなければならぬという従来の考え方を大きく変えるものであり、今後、算定された路網密度にとらわれることなく、林地の状況に応じて幅広い林道網計画を行うことが可能となり、表4-6は林道密度の一応の目安となる。なお、このことは集材距離に応じて複数の集材方式を組み合わせる場合に適合することであって、集材方式が単一で、集材距離に対して集材費用がかかる場合

には路網密度の許容範囲は狭くなり、それだけ密度算定の精度を要求される。いうまでもなく、集材距離に応じて集材方式を選択した方が集材費を安くすることができ、また皆伐作業を主体とした路網よりも間伐作業も含めた総合集材費に基づく方が合理的に路網密度を高めることができ、全体の木材生産費用を最小にすることができる（VI-1）参照）。

なお、林道開設の償却費は、償却年数15年として³⁶⁾、林道維持管理費が開設費時価の1.7%とすれば、林道維持費の $1 / 0.017 \cdot 15 = 3.9$ 倍となる。これを維持費に加えると林道の費用は4.9倍ともなり、これによって飽和密度を試算してみると、もともと飽和密度が低い急峻地形では5 m/ha 程度の減少ですむが、他の地形条件では密度が半分以下となってしまう、従来の成果よりも林道密度がかなり低くなってしまう。また、駐車型車両集材方式がほとんど困難となり、

表 4-6 従来の林道密度と飽和密度の比較

Table 4-6 Comparison of conventional and saturated forest-road density

Terrain	Conventional density		Saturated density			
	Skidding systems	Density (m/ha)	Skidding systems		Density (m/ha)	
			Clear cutting	Thinning or selection cutting	Clear cutting and thinning	Selection cutting
Very steep	Long-span skylines	5~15	Skyline systems		About 15	10~20
Steep	Semi-long span skylines	10~20	Large vehicles at the roadside, skylines	Light vehicles at the roadside, mono-cable, skylines	About 25	10~30
			Vehicles at the roadside			
Gentle	Tractors	20~30	Large vehicles at the roadside, tractors	Light vehicles at the roadside, and with spur roads** or mono-cable	15~30	10~30**
			—	Vehicles at the roadside		
Flat	Trucks	30~50	Tractors	Light forwarders off road	15~30	15~30

* With very low road-maintenance cost.

** Spur roads of 10~25 m/ha for light forwarders or skidders are added to these densities.

高度な機械化作業も望めなくなる。総合集材費が従来の単一集材方式による集材費よりも安く、しかも集材距離に対してほとんど変化しないので、償却費を控除することによって、結果的には従来の林道密度と整合性を保っているといえる。

本論のように集材方式を選択することによって、集材費用に対する集材距離の影響を小さくしていくと、あるいは集材距離にそれほど影響されない高能率な集材方式が開発されると、緩地形や平坦地でみられたように路網密度がそれほど高くなる。そうなると集材距離が長くなり、作業現場までの到達時間が長くなるおそれがある。幸いに飽和密度自体が高いので、最長300m程度ですむが、今後林業労働力の高齢化、減少化ともなれば、駐車型車両集材の導入の可能性を詳細に検討したり、飽和密度の許容範囲を拡張したりすることで対処することができる。

V 林道網配置と林道の規格構造

1 年間木材通行量の算定

林道、とくに集材作業を主目的とする施業林道の場合、木材通行量は道路沿に発生し、出発地（ソース）と目的地（シンク）を単に連結するだけの一般交通とは本質的に異なる。この点に関しては、河川等の水の流れに類似している。

ここでは山岳林の林道網配置に関して、次の仮定を設けることによって、林道の年間木材通行量を算定することにする。

1) 計画対象となる施業団地の出入口は1つとし、この出入口に向かって木材が林道上を集荷されてくるものとする。公道への集材は一応考えないものとし、施業団地内を公道が縦貫する場合は、この公道によって施業団地を適宜分割してそれぞれ別個に考えるものとする。この場合、林道から公道への連絡部があらたな計画対象地域の出入口となる。

2) 林道網は均等配置され、木材出材量も林道に対して均等に配分されるものとする。

3) 路網配置形態は樹枝形とする。林内路網が高密になると、輸送効率の面から循環路網が形成されるが、循環路網も次節でのべる手法に従ってこれを分断することによって、木材通行量分析の概念上は樹枝形とみなすことができる。

4) 路線の分岐点によって路線区間を区切ることにする。この区間内の上流と下流では厳密には木材通行量が異なるが、区間の林道規格は出口側となる下流に統一するものとし、ある区間の年間木材通行量は、上流の全区間の年間出材量に当該区間の年間出材量を加えたものとする。区間が極端に長い場合には、区間を適宜分割してそれぞれの規格を考えるものとする。

なお平坦ないし緩斜地林では、均質な路網配置が施され、幹線となる道路も一意的に定めることがむずかしく、しかも施業団地への出入口が複数あり、木材通行量分析は山岳林林道に比

べて重要な作業ではなくなり、むしろ均等配置を念頭に、幾何学的にも納得のいく配置を行うことの方が重要である。

いま、施業団地の1 ha 当り年間平均出材量を V_y ($\text{m}^3/\text{ha 年}$)、飽和林道密度を D (m/ha) とすると、林道1 m 当り年間出材量 V_r ($\text{m}^3/\text{m 年}$) は、仮定2) より、

$$V_r = V_y / D \quad (5-1)$$

で与えられる。

各区間の区間長を L_i (m) とすると、ある区間の年間木材通行量 V_r ($\text{m}^3/\text{年}$) は、

$$V_r = V_r \cdot \Sigma L_i \quad (5-2)$$

ただし、

ΣL_i : 当該区間 i を含めて当該区間より上流の区間長合計

となる。

この V_r を (3-6) 式に適用することによって、各区間 L_i の林道規格が与えられる。

ここで、最下流すなわち施業団地の出口における年間木材通行量は、施業団地の年間出材量に等しい。したがって、施業団地または年間出材量が大きいほど下流に高規格林道が必要となり、 ΣL_i が小さい上流の段階では、木材通行量が少ないために、低規格林道で十分である。

木材通行量ないしは林道規格を林道密度および路網配置と関連づけて直接あらわすことができればのぞましいが、 V_r を与えるところの ΣL_i は、施業団地の形状や林道網配置によって異なる。例えば同じ施業団地面積であっても、施業団地が細長い場合には、奥の方から順次高規格化されるが、形状が丸くなると施業団地出入口に木材通行量が集中するため、最低規格からいきなり高規格の林道が必要となる。したがって厳密には個々の計画対象地域について検討しなければならない。ただし、今後経験則によってある程度の判断を得ることは可能である (表5-2 参照)。

2 循環路網の評価

1) 循環路の木材通行量

林内路網が高密度になると循環路が形成され、さらには循環路が複数結合して、複合循環路網が形成される。循環路網があれば、施業団地内の離れた2地点間を移動するのに無駄な戻りや迂回をしなくてすむことになり、木材生産のみならず、森林管理上も極めて機能的である。とくに運材作業においては、往路をもどるよりも循環路を1周して施業団地の出口方向に向かった方が有利な場合がある。

ここでは循環路の木材通行量を、樹枝状路網に準じて算定するための方法を求めることにする。

まず1つの循環路を、勾配、路面の状況等に応じて、均質な n 区間に分割し、各区間長を l_i

(m) とし、反時計回りに添字を 1, 2, 3, ..., n とする (図 5-1)。

この循環路に対して、運材トラックには右回りと左回りの走行方向がある。この両方向において、各区間の空車時走行費用 (円/m) をそれぞれ u'_1, u'_2, \dots, u'_n および $u''_n, u''_{n-1}, \dots, u''_1$ とする。ここで ' は反時計回りを, '' は時計回りを意味する。

このとき、次式がなりたつ l_k をみつけることにより、空車で木材積荷点に到着するのに、両方向の走行費用がつりあう地点 K が求まる (図 5-1)。

$$\begin{aligned} u'_1 \cdot l_1 + u'_2 \cdot l_2 + \dots + u'_k \cdot l_k \\ = u''_n \cdot l_n + u''_{n-1} \cdot l_{n-1} + \dots + u''_{k+1} \cdot l_{k+1} \end{aligned} \quad (5-3)$$

同様に、 l_i における実車時の走行費用 (円/m) を両方向それぞれ w'_1, w'_2, \dots, w'_n および $w''_n, w''_{n-1}, \dots, w''_1$ とし、次式がなりたつ l_m をみつけることにより、実車運材時の走行費用がつりあう地点 M が求まる (図 5-1)。

$$\begin{aligned} w'_1 \cdot l_1 + w'_2 \cdot l_2 + \dots + w'_m \cdot l_m \\ = w''_n \cdot l_n + w''_{n-1} \cdot l_{n-1} + \dots + w''_{m+1} \cdot l_{m+1} \end{aligned} \quad (5-4)$$

$\sum_{i=1}^k l_i$ と $\sum_{i=1}^m l_i$ の大小によって、運材トラックの走行経路は図 5-2 のようになる。

図 5-2(a)において、OPM には OPM のための空車・実車の通行と、MK のための空車の通行があり、OK には OK のための空車・実車の通行と、MK のための実車の通行がある。MK には、MK のための一方通行があるだけで、M では空車のみ、K では実車だけの通行があるだけである。図 5-2(b)も同様に考えることができ、出材地点によって、往路を戻った方が有利な区間と、往路を戻らずにそのまま 1 周して出口に向かった方が有利な区間とが存在する。

図 5-2(a)において、O 点における OK および OPM に対する年間通行台数 V_{roK}, V_{roM} (台/年) (空車も含む)、および MK の年間通行台数 V_{rMK} (台/年) は、平均積載量 T t 車使用の場合、(5-2) 式より、

$$V_{roK} = 2V_f \cdot \sum_{i=1}^k l_i / T + V_{rMK} \quad (5-5)$$

$$V_{roM} = 2V_f \cdot \sum_{i=m+1}^m l_i / T + V_{rMK} \quad (5-6)$$

$$V_{rMK} = V_f \cdot \sum_{i=k+1}^m l_i / T \quad (5-7)$$

で与えられる。図 5-2(b)については、OM, OPK および MK に対する年間通行台数 $V_{roM}, V_{roK}, V_{rMK}$ (台/年) は、上式の m と k を入換えればよい。

木材通行量による循環路の分断を考える場合、図 5-2 から、OK および OPM は両端に分かれることになるので、MK 内で循環路の分断が行われることになる。そこで次に MK の分断を行うが、その前に走行費用 u, w (円/m) について考察してみる。

走行費用 u, w は、例えば筆者らの林道における燃料消費実験によれば²⁷⁾、表 5-1 で与えられる。

実験は4t車によるので、1時間当り運転労務費・車両損料費は表3-2から2389円とし、

$$u, w = 2389/v + f \cdot 3600 \cdot 100 / v \cdot 15 \cdot 1000 \quad (5-8)$$

ただし、

v : 走行速度 (m/時)

f : 15秒当り燃料消費量 (cc/15秒)

燃料代 : 100円/ℓ

から u, w を求めた。

表5-1から次のことがいえる。

- 1) 路面勾配が大きくなるにつれて、上り下りとも u, w が大きくなる。
- 2) 同程度の路面勾配では、舗装道路の方が u, w が小さい。
- 3) 実車上りは、実車下りに比べて走行費用が約2倍になり、当然のことながら上りのときは実車よりも空車の方が有利である。したがって実車で循環路をまわろうとする場合には、上り区間が大きな障害になる。

4) 空車上り/実車下りの走行費用の比は、未舗装道路で0.85~1.05, 舗装道路で0.84~1.27で大体1に近い。これは運転労務費や車両損料の割合が大きいためであるが、燃料代についてみると、勾配が13%ぐらいになると、空車上りは実車下りよりも60~70円/km高くなっている。

したがって、3)の結果から、ここでは循環路の通行は原則として空車上りと実車下りとし、実車上りは考えないことにする。この場合、循環路は谷沿の幹線道路から派生していくことになる。そして4)の結果より、空車上りと実車下りの走行費用は、林道網計画の精度の観点からもほぼ同一とし、

$$u_i = w_i \quad (5-9)$$

とすることができる。

さて、KMにおいて、両端点K, Mの通行台数は同じであり、実車下りも空車上りも走行費用が同じとすれば、KMを等分してそれぞれOK, OPMに帰属させることができる。すなわ

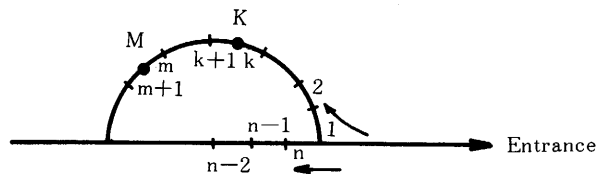


図5-1 循環路において走行費用がつりあう地点

Fig. 5-1 The equivalent point of transportation cost of going and returning in a circuit

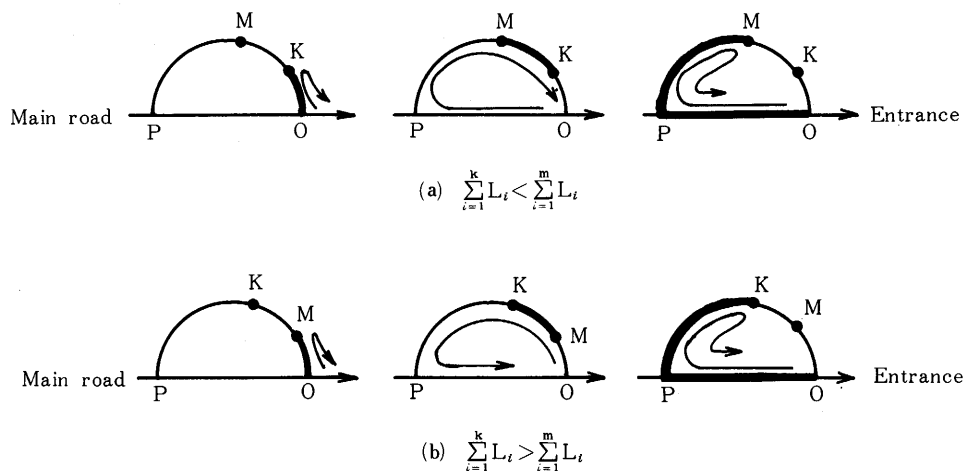


図5-2 運材トラックの走行経路

Fig. 5-2 Transportation route of log-trucks
 — Harvesting area

表5-1 林道走行費用u, w (円/km)の実験結果

Table 5-1 Log-trucking cost u and w (yen/km) from experiments

	Grade (%)	Unpaved ¹⁾			Asphalt pavement ²⁾		
		2.5	10.5	13.2	1.8	11.7	12.2
Up with no load u	Fuel consumption f (cc/15 sec)	29.89	66.78	47.08	28.03	66.87	63.03
	Speed v (km/h)	26.2	28.0	14.4	41.6	27.6	21.7
	Cost u (yen/km)	119	143	244	74	145	180
Down with load w	Fuel consumption f (cc/15 sec)	8.5	1.11	7.0	28.7	1.45	0.66
	Speed v (km/h)	23.0	14.3	10.4	35.0	21.2	16.0
	Cost w (yen/km)	113	169	246	88	114	150
Up with load w	Fuel consumption f (cc/15 sec)	38.04	110.6	70.56	34.45	111.8	105.1
	Speed v (km/h)	17.4	15.9	9.5	42.1	17.4	14.6
	Cost w (yen/km)	190	317	430	76	292	336

1) Irikawa forest-road in Experimental Forest of University of Tokyo in Chichibu, Saitama Prefecture

2) At Ootaki-mura, Saitama Prefecture

ち、循環路の分断は、KM の中点とすればよいことになる。

森林管理用車両の走行費用は、運材作業のように運行経路を特定できるものではなく、施業団地全域に対する一般管理費とするのが妥当であるので、循環路の分断に際しては考慮しないことにする。また、森林作業のための通勤輸送費は、運材費の1割前後として u 、 w に加算することができるが(III-4-2)参照)、ここでは林道網計画の精度上、加算しても(5-9)式が成り立つものとする。

2) 複合循環路網

前節では循環路の分断方法を求めたが、実際には循環路がいくつか結合した複合循環路網が形成されることが多い。本論では、以下にのべる手順にしたがって複合循環路網の分解を行い、複合循環路網を樹枝状路網としてとらえることにより、施業団地全体の木材通行量を総合的に分析することにする。

手順1: ある循環路に接続・流入する経路は、当該循環路の分断にとっては、無視することができる(図5-3)。

手順2: 複合循環路網は幹線道路から派生しているものとし、この幹線の施業団地出入口側に最も近い、最小の循環路から、前節の方法にしたがって循環路を順次分断していく(図5-4)。なぜならば、出入口側に最も近い最小の循環路に対して、手順1により、周囲の循環路は流入する経路とみなすことができるからである。なお幹線道路が循環路であるときは、あらかじめこの幹線道路の循環路を分断しておく。

なお、最初に入出口側から遠い循環路で分断すると、例えば図5-5のような不都合が生じる。すなわち循環路1に対して、①と②の2経路があり、①と②とでは分断点が異なることになる。仮に②の経路を前提として分断点を図中A点に設けても、次に循環路2に対してB点で分断されると、再び循環路1について①の経路で検討しなおさなければならず、結局最初に循環路1を検討したことが無意味となる。

また、最初に大きい循環路3について分断すると、例えばB点で分断されたときに、次に循環路1についてA点で分断されると、A点は循環路3に対する分断点にもなるので、最初の分断点B点が無意味になる。また循環路3について最初にA点で分断されることは、最初に循環路1を分断するとき生じる前記の不都合と同じになる。なお外側の大きな循環路の分断については、次の手順3を必要とする。

手順3: 外側の大きな循環路の分断点が、それ以前に行われた手順2による小さな循環路の分断点よりも、出入口側に対して内側に生じることは原則としてないものとする。

例えば図5-6において、循環路1でA点で分断され、外側の循環路2ではB点で分断されると、図中太線区間の出材はP点を経由することになり、循環路1の分断点による時の車両の流れに逆行することになる。なお循環路2がC点で分断されるならば、このような不都合は

生じない。通常の路網配置でこのような不都合が生じるのはまれであると思われるが、ショートパスとなるべき \overline{QR} の迂回率が極端に大きかったり、 \overline{PCR} と \overline{QAR} が接近している場合には起こりうる。いずれにしてもこのような路網配置は効率的な配置ではなく、手順3の適用箇所を調べることによって、複合循環路網の評価・検討を行うこともできる。

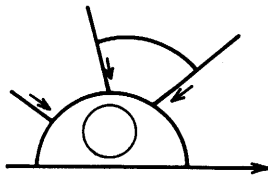


図5-3 手順1の例

Fig. 5-3 An example of Step 1

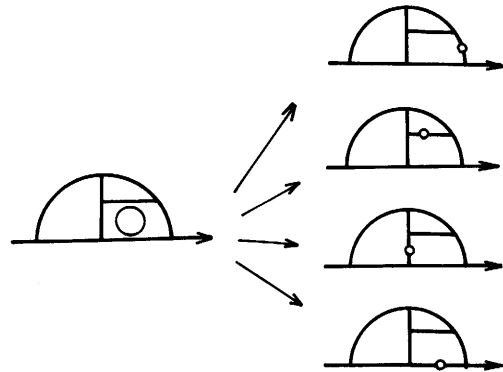


図5-4 手順2の例

Fig. 5-4 Examples of Step 2

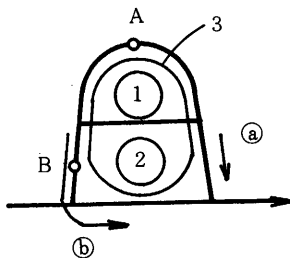


図5-5 手順2に対する不都合例

Fig. 5-5 A troublesome example of Step 2

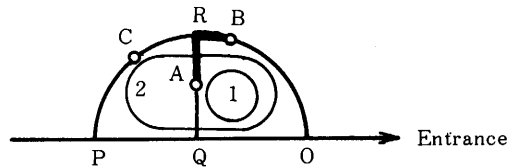


図5-6 手順3の説明

Fig. 5-6 Explanation of Step 3

3 適 用

1) 資 料

わが国において林内路網が比較的発達している施業団地を選び、(5-2)式および循環路網の分断法則を適用して、施業団地の年間木材通行量と林道規格を検討することにする。

ここでは対象地として、浜松営林署大代国有林、岐阜県I社社有林、愛知県K社社有林を選定することにする(表5-2)。分析に際しては、現行路網の配置、密度が経営目標、地形、林道費用、集材費用に応じて適切であり、飽和密度の許容範囲内に含まれているものと仮定する

ことにする。

各資料の路網模式図を図5-7に示す。K社社有林は対象面積が他に比べて小さく、小谷沿の樹枝状路網であるが、その他は循環路網が形成されている。とくにI社社有林は、山腹斜面に低規格の林道を平行に配置することによって、幹線林道を取り巻く形で複合循環路網を形成している。

資料の林道密度と平均集材距離は、表5-2のようになる。表5-2より、林道密度と集材距離の換算式として、 $\eta=0.3\sim 0.4$ として、(4-97)式の精度が高いことが確認される。ここで平均集材距離 S_m (m)は、堀ら⁹⁾の式を用いた。

2) 結果と考察

資料の路網にV-1, 2の木材通行量の算定手法を適用した結果、図5-7の模式図が得られた。図中の数字は路線の分岐点および循環路の分断点によって分割される区間長を示し、()

表5-2 資料の林道密度と集材距離、および林道規格ごとの ΣL_i

Table 5-2 Forest-road density and skidding distance, and total length of forest roads ΣL_i (m) required for each standard

	Oojiro National Forest		K' Co. Forest		I' Co. Forest	
Planning area						
A (ha)	802.4		210.9		939.7	
Forest-road density						
d (m/ha)	57.5		23.8		91.6	
Average skidding distance S_m (m)						
Actual measurement	85.7		146.5		34.5	
Eq. (4-95)	43.4		102.9		27.3	
Eq. (4-97)	$\eta=0.3$	56.4	132.0		35.4	
	$\eta=0.4$	60.8	141.5		38.2	
	$\eta=0.8$	88.4	—		—	
Annual harvested volume						
V_y (m ³ /yr·ha)	14	20	14	20	14	20
Average harvested volume to forest road of unit length						
V_r (m ³ /m)	0.243	0.348	0.588	0.840	0.153	0.218
Forest-road standard						
1	63,370~	44,250~	26,190~	18,330~	100,650~	70,640~
ΣL_i	45,270~	31,610~	18,710~	13,100~	71,900~	50,460~
(m)	14,850~	10,370~	6,140~	4,300~	23,580~	16,550~
4	~14,850	~10,370	~6,140	~4,300	~23,580	~16,550

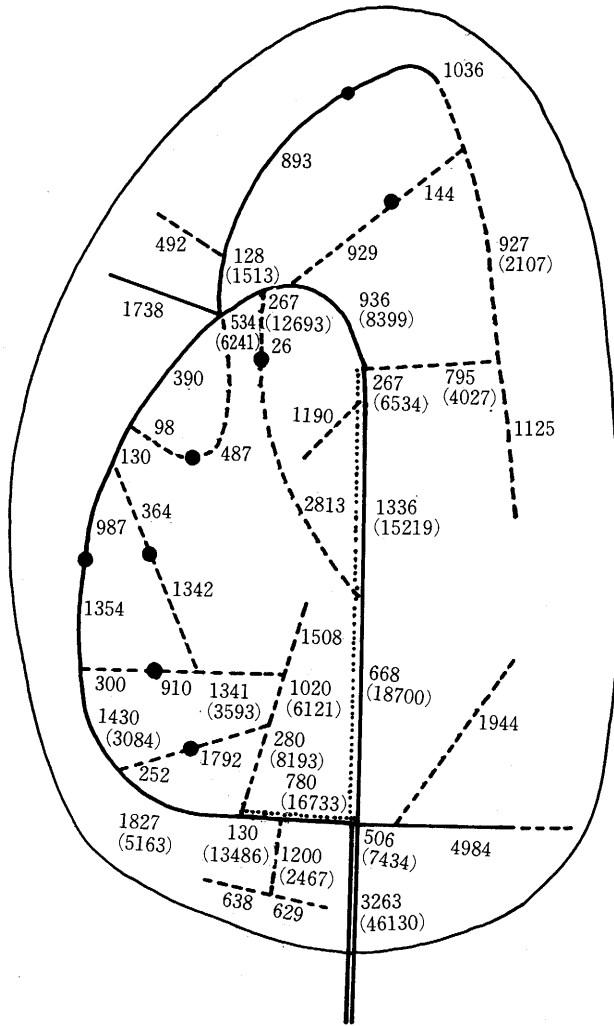
内は当該区間およびその上流の路線延長合計 ($=\Sigma L_i$) を示す。したがって (5-2) 式より、この ΣL_i から当該区間の年間木材通行量 V_r ($\text{m}^3/\text{年 m}$) を容易に求めることができる。なお施業団地出入口の ΣL_i が施業団地の全路線延長合計に等しいことを確かめることによって、 ΣL_i の検算をすることができる。

いま 1 ha 当り年間平均出材量 $V_y=14, 20\text{m}^3/\text{年 ha}$ とすると、資料の林道 1 m 当りの出材量 V_f ($\text{m}^3/\text{年 m}$) (表 5-2) に対して、年間木材通行量 V_r の道路費用を図 3-2(a) のモデルケースにしたがうものとすれば、(5-2) 式より、表 3-1 の林道規格をみだすのに必要な ΣL_i が与えられる (表 5-2)。図 5-7 には、この ΣL_i によって求められた規格 ($V_y=20$ とする) が記してある。また、幹線林道とみなしうる最長路線について、その木材通行量の成長過程をみると図 5-8 のようになる。図 5-8 は幹線林道への木材流入の集中度も意味している。

K 社社有林は対象面積が小さいため、対象林地入口を除いてほとんど規格 4 となり、出口付近で木材通行量が集中し、木材通行量の成長曲線が急に立ちあがる。これに対して I 社社有林は、林道密度が高いため V_f が小さく、奥地および幹線周囲の山腹林道は規格 4 で十分であるが、中央を貫く幹線林道には両側から木材が効率よく流入してくるため、奥地から順次高規格となる。大代国有林では、対象面積が大きいため、規格 3 以上が全林道延長の 14% を占めており、出入口付近で 3 本の林道が合流するので、規格 3 からそのまま規格 1 に昇格している。

以上の結果から、飽和密度に基づくほとんどの支線林道は規格 4 で十分であり、計画対象面積が大きくなるにつれて、対象面積が 200~400ha 以上になると (III-4-5) 参照)、幹線となる路線では順次高規格化されるようになる。

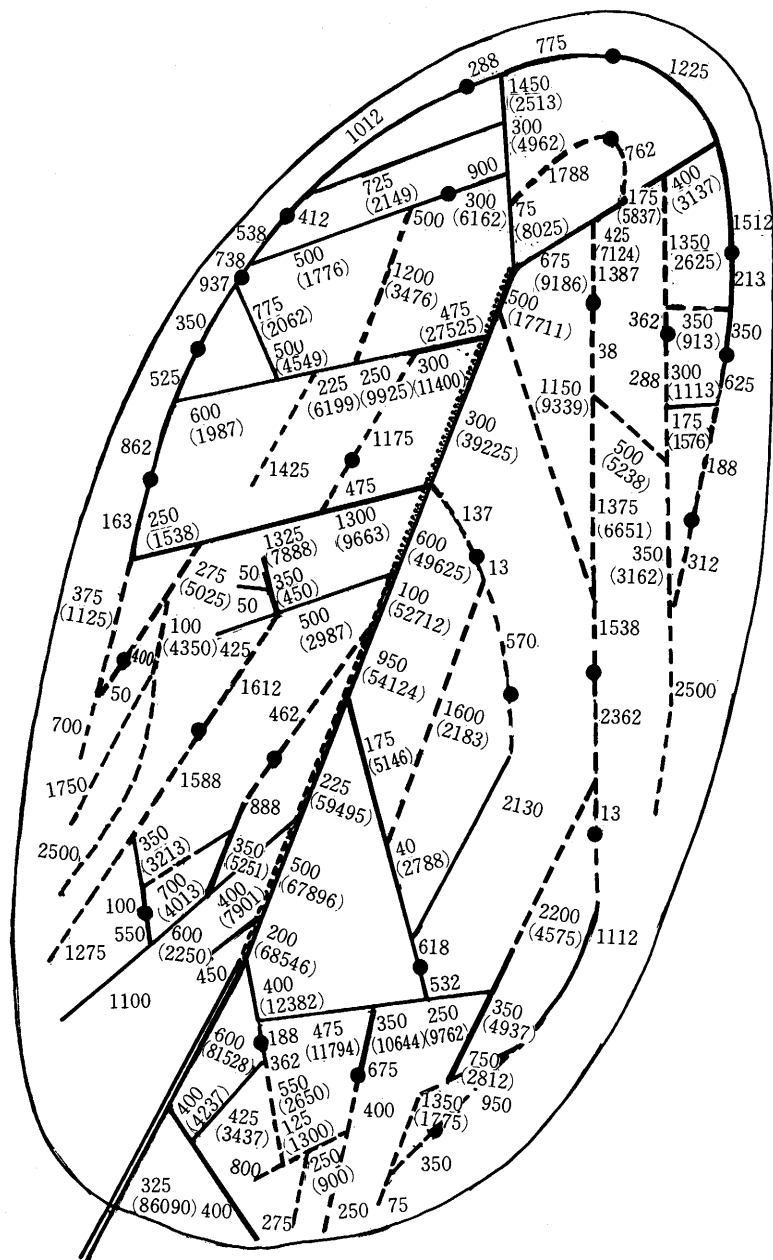
なお、仮に林道密度が半分になり、 V_f 、 V_r が 2 倍になっても、出口付近の ΣL_i が半分になるので、幹線の規格はかわらない。ただし支線の規格は V_f 、 V_r が 2 倍になることにより高規格になることは考えられる。同様に林道密度が高くなり、 V_f 、 V_r が小さくなっても、 ΣL_i が大きくなるので、出口付近の幹線の規格はかわらない。幹線林道の規格は、施業団地の全出材量によって与えられるものであり、施業団地出口付近においては、林道密度には影響されない。



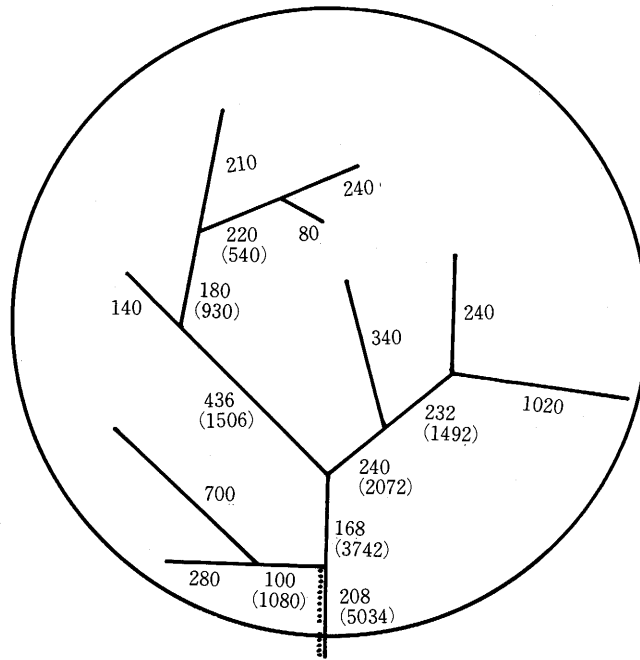
(a) 大代国有林
Ojiro National Forest

図 5-7 資料の路網模式図

Fig. 5-7 Schematic forest-road networks
 — Forest-roads (Standard 4),
 - - - - low-standard forest-roads,
 - · - · - projected routes,
 ● cutting point of a circuit for tree-shaped,
 ····· Standard 3, === Standard 2,
 ——— Standard 1



(b) I 社社有林
I' Co. Forest



(c) K社社有林
K' Co. Forest

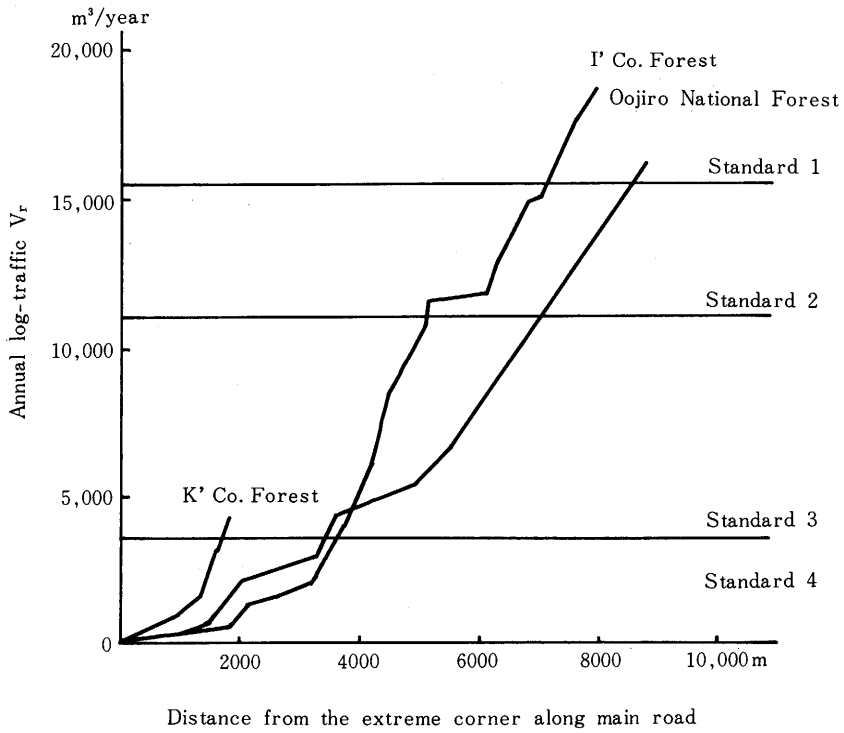


図 5-8 幹線林道の木材通行量の成長過程

Fig. 5-8 Log traffic of main road and road standard

VI 考 察

1) 総合集材費の正当性と作業道の必要性

本論では飽和密度を求めるときに、主伐と間伐を総合した総合集材費を用いたが、一方では一般に集材費が高くつく間伐作業を前提として低規格林道を配置する方法も考えられる。

いま(3-1)式において、林道を単一規格の最低規格とすると、集材費と林道費の和Fを最小にする林道密度は、

$$d_m = \sqrt{a \cdot V_y / r} \quad (6-1)$$

となる。このときFの最小値 F_{min} は、(3-8)式に示すとおりである。

a , b , d_m , F は、主伐よりも間伐材集材を前提に林道を入れた場合 a_1 , b_1 , d_{m1} , F_1 , 主伐と間伐材集材の両方を総合して林道を入れた場合 a_2 , b_2 , d_{m2} , F_2 とし、 r , V_y は同一とする。しかるにIV-5の結果より通常 $b_1 > b_2$ であり、(3-8)式の F_{min} は第1項よりも第2項の方がはるかにオーダーが高いので、総合集材費に基づく F_{2min} に対して、 $F_{1min} > F_{2min}$ となり、間伐を前提に路網配置することは、全体の費用としてみればコスト高になる。とくに $a_1 > a_2$ のときは、 $d_{m1} > d_{m2}$ となり、間伐主体に低規格林道を入れると林道の過剰投資となる。なお $a_1 < a_2$ のときは、 $d_{m2} > d_{m1}$ となり、主伐と間伐を総合した飽和密度よりも林道開設量はかえって少なくなってしまう。

$a_1 > a_2$ のとき、すなわち間伐材搬出の集材費が集材距離に大きく影響される場合、間伐を主体とした林道密度 d_{m1} と主伐と間伐の両方を総合した飽和密度 d_{m2} との密度差を、間伐材集材を補完するものとして、作業道として開設することも考えられる。しかしこのような作業道はまず不要であることが次のようにして証明することができる。なおここでいう作業道とは、III-1で定義したように、短期に償却される一時的な道路施設であり、小型運材トラックが通行可能な程度の規格を有するものとする。

いま主伐材はすべて林道に出材するものとし、間伐材は林道および作業道に出材するものとする。飽和密度(既知とする)を D (m/ha), 作業道密度を d_s (m/ha)とし、集材費を(3-1)式と同様とすれば、このときの主伐材の平均集材費は $a/D + b$ (円/m³), 間伐材の平均集材費は $a_1 / (D + d_s) + b_1$ (円/m³)とあらわすことができるので、林道費および作業道費と集材費の合計 F (円/m³)は、

$$F = \{r_y \cdot D + r_s \cdot d_s + (a/D + b) V_n + (a_1 / (D + d_s) + b_1) V_{th}\} / (V_n + V_{th}) \quad (6-2)$$

ただし、

V_n : 施業団地の主伐材出材量 (m³/年 ha)

V_{th} : 施業団地の間伐材総出材量 (m^3 /年 ha)

r_y : 林道維持費 (円/年 m)

r_s : 作業道の償却費と維持費を加えた費用 (円/年 m)

となり,

$$d_s = \sqrt{a_1 \cdot V_{th} / r_s} - D \quad (6-3)$$

のとき F は最小となる。 $d_s > 0$ ならば、間伐材集材を補完するものとして、作業道を開設することができる。

しかるに集材距離に応じて集材費最小となるように間伐材集材方式を選択していくとなると、 a_1 が小さくなるので、試算の結果、まず $d_s < 0$ となる。また駐車型車両集材方式を前提として a_1 を大きくしても、飽和密度 D 自身も (6-3) 式第 1 項よりも大きくなる。したがって、いかに r_s が小さく、 a_1 、 V_{th} が極めて大きい、たとえば集材距離に対する作業条件が厳しいながらも大量の間伐材を生産しなければならないような場合でも、作業道を必要とする場合にはいたらない。

以上のことは、運材作業も可能なほどの一時的な道路施設は成立しがたいことを意味し、作業道と称しながら実際は永久施設であるというわが国の実情を裏付けるものでもある。

なお主伐材も作業道に出材するものとすれば、(6-2) 式は、

$$F = (r_y \cdot D + r_s \cdot d_s) / (V_n + V_{th}) + a_2 / (D + d_s) + b_2 \quad (6-4)$$

となり、

$$D + d_s = \sqrt{a_2 (V_n + V_{th}) / r_s} \quad (6-5)$$

のとき F は最小となる。しかるにこのときの $D + d_s$ は最低規格の林道費用を r_s としたときのあらたな飽和密度にほかならない。

2) 集材用車両専用作業路の密度

IV-4-2) の専用作業路を利用して車両集材するときの専用作業路は、個々の路線の使用頻度や経済性をも考慮しなければならないが、ここではその所要作業路密度について考察してみる。

作業路には運材トラックが入れないものとし、主伐材および林道沿の間伐材は林道上に出材し、林道から離れた林地の間伐材は専用作業路を利用して車両集材するものとする。なお林道沿の間伐材は駐車型車両集材によるものとし、専用作業路と同一の小型集材車両を利用するものとする。また林道に対する図 4-1 の標準伐区モデルは、作業路に対しても成り立つものとし、伐区と作業路は接するものとする。

まず計画対象林地のすべてを間伐対象林と仮定する。最大木寄距離を S (m) とし、単位面積当りの年間平均出材量を $V_w (= V_i \times 10^{-4})$ (m^3 /年 m^2) とする。間伐対象林では 1 年以内に間伐するものとするれば、 V_w は間伐 1 回当りの単位面積当り平均出材量としてもよい。作業路の償

却費と維持管理費の合計を r_s (円/年 m), 作業路の迂回率を η とし, 林道沿の間伐材を一応無視すれば, 作業路の費用は $r_s \cdot (1 + \eta) / 2V_w \cdot S$ (円/m²) となる ((4-103) 式参照)。

作業路までの木寄方式には種々考えられるが, ここでは集材用車両の付属クレーンやウィンチを使用して木寄するものとし, 木寄費用として(4-83)式を代用することにする。これに作業路の費用を加えると,

$$F(S) = 17.65S + 227 + 26250000 / V_i \cdot S^2 + r_s \cdot (1 + \eta) / 2V_w \cdot S \quad (6-6)$$

を最小にする S ($=S_{\min}$ とする) の 2 倍が作業路間隔になる。対象林地の間伐対象林の割合 R_t を (間伐回数) / (伐期齢) とすれば, 上記作業路間隔をこの割合で除したものが, 対象林地の実際の間隔となる。

以上の作業路間隔に対して, 飽和密度 D (m/ha) のとき, 作業路 1 路線の延長は $10000(1 + \eta) / D$ (m) となるので, 作業路密度 d_s (m/ha) は,

$$\begin{aligned} d_s &= \{10000(1 + \eta) / D\} \times \{D / (1 + \eta) 2S_{\min}\} \times R_t \\ &= 5000R_t (1 + \eta) / S_{\min} \end{aligned} \quad (6-7)$$

となる。

いま $V_w = 0.01$, $\eta = 0.3$ とし, $R_t = 9 / 60$ とすれば, $r_s = 200, 500, 1000, 2000$ に対して, (6-6), (6-7) 式より作業路密度は, 飽和密度に加えて, それぞれ 25.0, 19.9, 15.2, 11.1 m/ha となり, このときの作業路の費用は, 333, 663, 1015, 1477 円/m² と r_s の増加に伴い大きくなる。なお, 若齢林分が多くを占める場合には, 間伐対象林の割合 R_t が大きくなるので, それだけ作業路密度も高くなる。

択伐作業の場合も, R_t を $1 / (\text{回帰年})$ と置換えれば, 上式をそのまま使用することができる。回帰年が短くなれば作業路の利用回数がふえ, また作業路の償却期間が長くなれば r_s が小さくなり, それだけ作業路が高密になる。

3) 林道の一部高規格化と飽和密度の変化

飽和密度によって与えられた路網配置の一部を木材通行量に応じて高規格化すると, その分の林道維持費が上がり, 飽和密度算定のための最低規格の林道費用が割増しされることになる。

高規格化する以前の飽和密度の全延長 $\sum_{i=1}^n L_i$ (m) および林道維持費 r_{yn} (円/年 m) に対して, 高規格化後の林道平均維持費 (円/年 m) は,

$$\frac{\sum_{i=1}^n r_{y_i} \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (6-8)$$

ただし,

添字 i : 林道の規格

r_{y_i} : 各規格の林道維持費 (円/年 m)

L_i : 各規格の全路線延長 (m)

に増加する。

大代国有林の林道規格について(表5-2), (6-8)式を試算すると, $r_{yn}=150\text{円}/\text{年 m}$ に対して, 高規格化後の林道平均維持費は248円/年 m となり, (6-1)式より飽和密度は $\sqrt{150/248}=0.78$ 倍に減少するが, この程度の高規格化ならば図4-13から確認できるように, 駐車型車両集材方式の採用を検討する場合を除いては, まず飽和密度の許容範囲内におさまるものとみなすことができる。

4) 複合路網密度理論との関係

規格の異なる林道の組合せ理論として, 南方²⁸⁾の複合路網密度理論がある。本論では林道規格に対する集材方式の違いはないものとしているが, 複合路網密度理論では, 地形級に応じて林道規格と集材方式の代表的な組合せがあらかじめ設定されている。複合路網密度の本来の意図は, 集材方式に対応した林道構造の高規格化と低規格化の分極化にあるものであり, 集材方式が大型機械による高規格林道と小規模作業に限定されるところの低規格林道との組合せ理論として位置づけすることができる。

5) 飽和密度の開設進度と限界林道密度との関係

南方²⁴⁾は, 木材販売価格から, 企業の利潤, 一般管理費, その他生産費を差し引いた費用を「限界生産費」とし, 林道密度に対して下に凸の「主要生産費曲線」が限界生産費に等しくなるときの密度を「限界林道密度」とし, 現在の企業余力から林道の拡充限度としての限界林道密度を提示した。

総合集材費に基づく飽和密度は, 必要最小密度であると同時に, すべての林道が償却完了したときの最低規格林道による最大限密度であり, しかも飽和密度の木材生産費は密度に対してほとんど変化しないので, その意味では限界密度でもある。そして飽和密度は許容範囲が広いので, 実際の運用上は南方の限界林道密度と必要最小密度の差をカバーするものと考えることができる。

飽和密度を自力開設する場合の開設進度 (m/年 ha) は,

$$\frac{(\text{材価}) \times (\text{材価のうち当年度林道開設に充当できる割合}) \times (\text{ha 当り年間木材生産量})}{(\text{事業者の負担に帰する平均開設単価})}$$

となる。上式において, 「材価のうち林道開設に充当できる割合」は開設進度に直接影響するものであり, その具体的数値は, 材価, 森林作業費, 一般管理費, 既設林道の維持補修費, 前年度までの林道開設の償却費等といった林業経営内容によって大きく変動する。逆に目標達成のための開設進度から材価のうち林道開設に充当すべき割合を定めることもできる。この値の決定は限界林道密度の考え方と本質的には同じであり, 限界林道密度理論が将来計画立案時点の限界生産費に基づくのに対して, 上式の開設進度は経営状態の変化に応じて調節することができる。したがって, 飽和密度の開設進度はその実現において経営の時間軸に沿って限界林道密度を表現したものと見える。

VII 結 論

林道開設の償却費は、当面の木材生産にみあった投資限界に基づくとところの開設進度を決定するだけのものとし、林道密度算定から控除して林道網計画をたてることができる。この場合、林道密度決定に関与する林道の費用は年間維持管理費だけとなり、集材費同様、時価で評価することができる。利率や償却状態等の変動要素を省くことができるので、従来に比べて林道網計画が非常に容易となる。

飽和密度の数値そのものは、概して従来の常識的な線にのっているものとみなすことができ、総合集材費に基づくことにより、合理的に路網密度を高めることができる。年間林道維持費が約200円/年 m 以下であれば、駐車型車両集材のみによる集材作業の可能性も生じ、この場合飽和密度は飛躍的に増大し、林道維持費も含めた集材費は非常に安くなり、高度な機械化作業が可能となる。飽和密度は一般に許容範囲が広く、この点に関しては、集材費が集材距離に比例し、これに応じた最適の密度を正確に求めなければならないという従来の考え方を変えるものであり、今後、算定された路網密度にとらわれることなく、林地の状況に応じて幅広い林道網計画を行うことができる。

なお本論では、林道維持管理費の積算が困難な現状から、維持管理費を開設単価の1.7%程度としたが、駐車型車両集材を前提とした飽和密度の算定や、林道の規格構造決定、あるいは林業外利用による林道の通行に対する維持費の負担額算定にとって、維持管理費は重要な因子となるので、今後、林道規格、交通量、地形、気象条件等と関連させながら、資材費、重機の費用、労務費等の費目ごとに、維持管理費の具体的金額について資料を収集、分析する必要がある。

林道の規格構造は、年間木材生産量と林道費用にもよるが、計画対象面積が200~400ha 以下ならば、単一規格とすることができる。しかし、それ以上の面積になると、幹線となる林道の規格構造階層化を考えなければならなくなる。その際、循環路網も観念的に樹枝状路網としてとらえることによって、容易に年間木材通行量を算定し、林道の規格構造を定めることができる。なお、一応小型運材トラックが通行可能な程度の規格を有する「作業道」は不要であり、林道として飽和密度に繰入れることができる。

要 旨

本論では、永続する林業経営において、永久施設としての林道の開設費を林道密度の最終目標決定因子として重きをなすことには問題があるとし、林道の償却費は木材生産費用として計

上はしても、林道密度の決定には関与しないものとした。この場合、林道の償却がすべて完了した状態を想定することになり、林道密度決定に関する林道の費用は、年間維持管理費だけとなり、林道開設費と償却費は、当面の木材生産にみあった投資限界に基づくところの開設進度を決定するだけのものとなる。以上の考え方に基づくと、林道の費用は集材費や運材費同様、時価で評価することができ、従来のような利率や償却状態等の考慮は不要となり、林道網計画が非常に容易となる。具体的には林道の年間維持管理費は、開設単価時価の1.4%程度であり、これに災害復旧費を見込むと1.7%となる。林道の規格構造が最低限の規格のときに集材費と維持管理費の合計が最小となるので、このときの林道密度を「飽和密度」とよぶことにする。一方、林道上の運材費は、林道の年間木材通行量に比例して維持管理費に加算することができ、これにより年間木材通行量に応じて林道の規格構造を決定することができると同時に、飽和密度による林道費、集材費の最小化とあわせて、運材費も含めた木材生産費用を最小にすることができる。なお、一部の林道を高規格化することによる全体の維持管理費用増加が飽和密度に及ぼす影響は、まず無視することができる。また、木材生産に必要な育林作業や伐出作業のための通勤輸送費は運材費の1割程度であり、これを運材費に加算すれば、さらに計画精度を向上させることができる。年間木材生産量と林道費用にもよるが、計画対象面積が200~400ha以下ならば、林道の規格構造を最低規格の単一規格とすることができる。しかし、それ以上の面積になると、木材通行量に応じて規格構造の階層化を考えなければならなくなる。事例分析の結果、支線林道は飽和密度のままの最低規格で十分であり、計画対象面積が大きくなるにしたがって、幹線林道が順次高規格化されるようになる。

一方、集材費は、主伐、間伐作業ともそれぞれ使用しうる複数の集材方式を想定し、集材距離に応じて集材費が最小となるように集材方式を逐一選択していき、間伐から主伐までの集材費用を出材量に応じて合成した「総合集材費」を用いた。間伐作業も考慮した総合集材費に基づくことにより合理的に路網密度を高めることができ、全体の木材生産費用を最小にすることができる。集材費用は、新たに導かれた理論方程式により算定した。

急峻、急、緩、平坦の4地形を想定し、総合集材費に林道維持費を加えて飽和密度を求めた。急峻地形では間伐、皆伐作業いずれも架空線集材方式とすると、飽和密度は15m/ha前後となる。急地形では、架空線集材方式のほかに、駐車型車両集材方式や、間伐作業はモノケーブル方式が使用可能となり、飽和密度は25m/ha前後となる。駐車型車両集材は短距離ならば最も高い生産性をあげることができ、年間林道維持費が約200円/年m以下になると、駐車型車両集材のみによる集材作業が可能となり、このとき飽和密度も100~120m/haと飛躍的に増大し、高度な機械化作業が可能となる。緩地形になると、トラクタ全幹集材と専用作業路を利用した車両集材やモノケーブル方式となり、飽和密度は15~30m/haとなる。一般に車両系集材方式は積載量が多いので集材距離の影響が少なく、飽和密度はそれほど高くはない。専用作業路密

度は、間伐作業の木寄費用および作業路の維持管理費・償却費、間伐林分の割合から、飽和密度とは別途に算定することができ、10～25m/haである。平坦地形では、間伐作業は小型集材車両による載荷式集材方式、皆伐作業はトラクタ全幹集材となり、飽和密度は15～30m/haとなる。林内走行によって高効率な省力作業が可能となるので、飽和密度はそれほど高くなり、林道維持費も含めた集材費は他の地形条件の7～8割である。択伐作業は、一部を除き皆伐作業よりも飽和密度が若干低くなるが、飽和密度の許容範囲が非常に広いので、林地の状況に応じて柔軟な計画をたてることができる。また緩地形の択伐作業では、駐車型車両集材のみによる集材作業や集材用車両の専用作業路を主体として、高密度な路網が形成される。

飽和密度による林道は、林道としての最低機能は満たしているものであり、従来の林道が過剰規格でない普通林道に基づいていることを考えると、従来の常識的な線にのっているものとみなすことができる。また総合集材費が従来の単一集材方式による集材費よりも安く、しかも林道の費用から開設償却費を控除しているために、結果的には、飽和密度の数値そのものは従来の林道密度に合致している。

総合集材費は、集材距離に応じて集材方式を選択していき、さらに出材量に応じて合成するために、最大集材距離が約100m以上になると集材距離に対してほとんど変化しなくなる。したがって、駐車型車両集材方式を中心に計画する場合を除いては、飽和密度の許容範囲が広い。この点に関しては、集材費が集材距離に比例し、これに応じた最適密度を正確に求めなければならないという従来の考え方を考えるものであり、今後、算定された路網密度にとらわれることなく、林地や経営状況に応じて幅広い林道網計画を行うことが可能となる。

林内路網が高密になると一般に循環路網が形成されるが、循環路については右回り、左回りの運材費用の大小からこれを分断することができ、さらに循環路網が重なりあった複合循環路網についても施業団地入口から順次分断していく本論の分断方法にしたがって、樹枝状路網として分解することができ、木材通行量の分析を容易ならしめる。

なお本論では、運材トラックが走行可能な永久的な林業用道路は、名称に如何を問わず「林道」とし、「作業道」は一応小型運材トラックが通行可能な程度の規格を有する一時的な道路施設として両者を区別しているが、このような「作業道」はまず不要であることが証明でき、前記の集材用車両のための専用「作業路」とあわせて、林内路網の性格づけも明確になった。

引用文献

- 1) BYRNES, J. J., NELSON, R. J. and GOOGINS, P. H.: Cost of hauling logs by motor truck and trailer. Pacific Northwest Forest & Range Experiment Station, Oregon, 1947
- 2) HAFNER, F.: Zur forstlichen Wegenetzlegung in steilem Gebirgsgelände. Allgemeine Forstzeitung 75

- Jahrgang, folge 3/4, 1964 (東大森林利用学教室訳：森林利用研究会資料59, 1964)
- 3) 平賀昌彦：林道の経済効果及び適正密度について。帯広営林局，1965
 - 4) —————：電算法による作業道網計画法。81回日林講，1971
 - 5) —————：J. B. 法による林道通過点決定手法について。83回日林講，1973
 - 6) 北海道開発庁：奥地総合開発調査報告書。1961
 - 7) —————：北海道の林道現況と問題点。1963
 - 8) 堀高夫・北川勝弘・長谷川好正：林内到達距離の分布に関する研究。日林誌53 (11)，1971
 - 9) HUGGARD, E. R.: Foresters' Engineering Handbook. W. Heffer & Sons Ltd., Cambridge, 1959
 - 10) 上飯坂実：林道の最適密度に関する研究 (I) 標準モデルについて。日林誌45 (9)，1963 (英文)
 - 11) —————：同上 (II) 開発路網密度について。日林誌48 (2)，1966 (英文)
 - 12) —————：森林利用学序説。地球社，東京，1971
 - 13) 神崎康一：グラフ理論による林道網設計法。日林誌48 (10)，1966 (英文)
 - 14) 加藤誠平：林道網に関する研究—林道密度について。東大演報63, 1967 (英文)
 - 15) 建設産業調査会：道路ハンドブック。建設産業調査会，東京，1980
 - 16) 小林洋司：山岳林における林道網計画法に関する研究。宇大術報告特輯38, 1984
 - 17) 小島幸治：トラクタ集材作業の工期と作業条件との関係について。日林誌43 (6)，1961
 - 18) 小山梯：林業機械の作業工期に関する理論的研究。1960
 - 19) LARSSON, G.: Studies on forest road planning. Transac. of R. I. T, 1959
 - 20) LÜNZMANN, K.: Der Erschliessungskoeffizient, eine Kennzahl zur Beurteilung von Waldwegenezen und seine Anwendung bei Neuplanungen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 87, 1968 (藤原登抄訳：機械化林業205, 1970)
 - 21) 前田清：公共投資論。東洋経済新報社，東京，1961
 - 22) MATTHEWS, D. M.: Cost Controll in the Logging Industry. McGraw-Hill Book Co., New York, 1942
 - 23) 南方康：林道の線形と走行速度との関係。日林誌50 (1)，1968
 - 24) —————：林道網計画に関する研究。東大演報64, 1968
 - 25) —————：林内における基礎路網密度。日林誌59 (8)，1977
 - 26) —————：林業における作業機械化の可能性。森林文化研究4 (1)，1983
 - 27) —————：仁多見俊夫・酒井秀夫・伊藤幸也：林道路面状態と自動車の燃料消費率。日林誌68 (3)，1986
 - 28) —————：酒井秀夫・伊藤幸也：複合的路網による林道網整備。東大演報74, 1985
 - 29) 森岡昇：架空線集材の集材区域と作業能率に関する研究。名大演報5，1970
 - 30) 村山茂明・小林洋司・松尾毅：林業用ハンギングモノレールの路線選定について。宇大演報18, 1982
 - 31) 日本林道協会：林道必携—設計編。日本林道協会，東京，1982
 - 32) 大川畑修・酒井秀夫：帯広式集材方式における横取距離の決定法と架線の最適架設位置。日林誌58 (5)，1976
 - 33) PETERS, P. A.: Spacing of roads and landings to minimize timber harvest cost. For. Sci. 24 (2)，1978
 - 34) PESTAL, E.: Kardinal Punkt 500! Ruckugsmethode entscheiden Wegnetzdicthe, Holz-Kurier, 1963 (加藤誠平訳：森林利用研究会資料58, 1964)
 - 35) 林野庁：民有林林道事業のあらまし。1973~1984
 - 36) 林野庁監修：林業土木法規集—林道編。林土連研究社，東京，1977
 - 37) 林政総合調査研究所：林道の整備効果の評価に関する調査報告書。1984
 - 38) 酒井徹朗：林道の配置計画について (I) 端点除去法。京大演報54, 1982

- 39) —————：同上 (II) 集材距離・開設長による最適配置. 京大演報55, 1983
- 40) 酒井秀夫：架空線集材作業の架設撤去費に関する事例研究. 92日林論集, 1981
- 41) —————：路網密度と集材距離の換算式. 37日林関東支論, 1986
- 42) —————：伊藤幸也・南方康・上飯坂実：急峻地における懸垂式モノレール運材作業. 東大演報73, 1984
- 43) —————：上飯坂実：伐区の形の集材機作業に及ぼす影響. 90日林論集, 1979
- 44) —————・—————：集材機作業条件の統計的考察 (I) (II). 日林誌62 (7, 9), 1980 (英文)
- 45) —————・—————：架空線集材作業と林道との関係. 日林誌63 (11), 1981
- 46) —————・—————：間伐材木寄作業に関する研究. 日林誌67 (3), 1985
- 47) 沢口勇雄：林道の機能に応じた規格・構造のあり方について. 林野庁長期委託研修報告書, 1979
- 48) 森林利用研究会：林内自動車道における機能の実態. 森林利用研究会資料104, 1982
- 49) SUNDBERG, U.: A study of timber transportation. SDA, 1960
- 50) 天竜市育林研究会：もうかる林業への道—天竜地方における優良材生産技術指針. 1979
- 51) 谷本昭功：林道開設費と維持管理. 6回治山林道研究論集, 1971
- 52) 梅田三樹男・辻隆道・井上公基：標準功程表と立木評価. 日本林業調査会, 東京, 1982
- 53) USDA Forest Service: Roads Handbook. Washington, 1959 (農林水産業生産性向上会議：アメリカの林業, 1968 (抄訳))
- 54) WALLACE, O. P.: Ratios for determining the economic road and landing or skidding spacing. J. of For. 55, 1957
- 55) WINFREY, R. (日本道路協会監訳)：道路経済学. 日本道路協会, 東京, 1979
- 56) 米山欽一・坂元左：減価償却の税務と耐用年数のすべて (4訂版). 税務経理協会, 東京, 1985

(1986年4月18日受理)

Summary

1. I investigate an ideal forest-road network system which would minimize the total wood-production cost for continuous long-term forest management. I assumed that the depreciation of the road-network construction already had been finished. Indeed, the road-construction cost composed part of the wood-production cost, but I separated the depreciation cost of road construction from the costs of the final forest-road planning. The road-construction cost or its depreciation is only a factor of progress in realization of a forest-road network, such as investment, forest resources, and forest management. The forest-road density is determined by skidding cost and annual road-maintenance cost. It becomes easier to plan forest-road networks because road costs can be estimated by the current prices similarly to skidding cost without considerations on interest rates and the various depreciation factors of roads. I proved that the lowest forest-road standard makes the total cost of skidding and road-maintenance at a minimum and gives maximum road-density. I termed this forest-road density based on the lowest standard "saturated road-density". By adding log-trucking cost to road-maintenance cost in proportion to log traffic, forest roads of the saturated road-density type can be up graded according to log traffic, which finally minimizes the total cost of forest roads, skidding, and log trucking

in the planning area.

The results of road-cost analysis are as follows: 1) Road-maintenance cost is approximately 1.7% of the current road-construction prices including a 0.3% average repair cost of damage from natural disasters. 2) Transportation of labor for silviculture and logging operations costs only 10% of log-trucking cost. 3) It is necessary to consider forest-road standards according to log traffic in planning areas of more than 200~400 ha.

2. Before planning forest-road density, I derived the theoretical equations of skidding costs of all available skidding systems from commercial thinning to clear cutting. I defined "synthetic skidding-cost" as the synthesized skidding-cost from the first commercial thinning to the final cutting according to the log volume harvested with selection of the best skidding systems for the skidding distances. The synthetic skidding-cost proved to be the right concept, giving rational road-density in consideration of commercial thinnings and minimizes the total wood-production cost.

For four types of terrain in man-made forests, the saturated road-densities are as follows: 1) In very steep terrain, skyline systems are available both for commercial thinnings and clear cutting, and the saturated road-density is approximately 15m/ha. 2) In steep terrain, skyline systems, skidders with winches or cranes, mobile yarders mounted on vehicles at the roadside, and monocable systems made especially for commercial thinnings, are available. The saturated road-density is approximately 25m/ha. As skidders or mobile yarders at the roadside are most efficient at short skidding-distances, these machines and a very high road-density, such as over 100 m/ha, make the best combination when the road-maintenance cost is less than 200 yen/m/year. 3) In gentle sloping terrain, light forwarders or small skidders with winches or cranes, or mono-cable systems for commercial thinnings, and tractors for clear cutting are used. The saturated road-density is 15~30 m/ha, a value not so high because the cost of tractor skidding with large payloads is not affected by skidding distance. However, light forwarders or skidders need spur roads of 10~25 m/ha. This spur-road density can be determined by its costs of depreciation and maintenance, prehauling cost, and the proportion of thinning area. 4) In flat terrain, small forwarders which can maneuver in forests being thinned and tractors for clear cutting are used. The saturated road-density is 15~30 m/ha, and the wood-production cost is only 70~80% of that of the other types of terrain. 5) The saturated road-density of selection cutting systems is slightly lower than clear cutting systems, but it has wide ranges. The forest roads of gentle sloping terrain with selection cutting systems also need spur roads for skidders or light forwarders, or a very high road-density for mobile yarders at the roadside.

The saturated road-density is not so different from the conventional values both because the synthetic skidding-cost is kept low and the road-construction cost is not included. However, the saturated road-density has wider ranges than conventional densities depending on only one or two skidding systems, because the synthetic skidding-cost does not vary when the skidding distance is more than 100 m. This result will change the conventional road-network planning which has needed an exact density with

only a skidding system.

3. Dense forest roads will form circular-road networks which can be considered tree-shaped networks by cutting the circuits at the equilibrating points of the log-trucking cost of going clockwise and counterclockwise. Even more complicated circular-road networks also can be formed into tree-shape by the new method which cuts circuits one by one from the entrance of the planning area. The tree-shaped networks are used for anticipating log traffic like a flow analysis of water. Most roads that are based on the saturated road-density are sufficient with lowest standards. Only main roads on which log traffic is concentrated will be given higher ratings as the planning area becomes larger.

4. Although I call all permanent forest roads "forest roads" and all temporary low-standard roads on which small trucks can travel "strip roads" in this paper, these strip roads have proved to be unnecessary by the saturated road-density.

主な記号一覧表

(掲載順)

r_i : 林道の年間費用 (円/年 m) 添字 i は林道の規格	Δt_0 : 作業時間の増加 (時/日)
d_i : 林道密度 (m/ha)	V : 1 施業期間 n 年間の木材総生産量 (m^3/ha)
F : 林道の費用と集材費の合計 (円/ m^3)	N_w : 上記の労働投入量 (人/ha)
V_y : 1 ha 当り年間平均出材量 ($m^3/年$ ha)	u : 運材通勤単価 (円/ $m^3 m$)
a : 集材距離に対する集材費の比例定数	$r_{y,i}$: 林道の年間維持費 (円/m 年)
b : 集材費の定数項	V_r : 林道の年間木材通行量 ($m^3/年$)
e : 燃料費に対する油脂費の割合	$V_{r,i}$: 林道規格 i を採用するのに最低必要 な木材通行量 ($m^3/年$)
g : 勾配および路面に対する燃料消費の 修正係数	A_i : 上記の所要森林面積 (ha)
r_{yn} : 最低規格の林道の年間維持費(円/年 m)	L_n : 計画対象地域の平均運材距離 (m)
D : 飽和密度 (m/ha)	\bar{V}_r : 計画対象地域の平均木材通行量($m^3/$ 年)
p : 通勤用自動車定員 (人)	L : ある集材方式の最大作業距離 (m)
k_1 : 林道改修前の通勤車両走行経費(円/ 時)	$f(L)$: 集材費 (円/ m^3)
k_2 : 林道改修後の通勤車両走行経費(円/ 時)	$F(L)$: いくつかの $f(L)$ の中の最小値 (円/ m^3)
t_1 : 林道改修前の往復通勤時間 (時/日)	$F_i(L)$: 第 i 回間伐時の $F(L)$ 。 $i = n$ のとき は主伐時。択伐作業の場合は、 $n =$ 1。
t_2 : 林道改修後の往復通勤時間 (時/日)	C : 間伐・主伐を総合した最小集材費 (円/ m^3)
t_0 : 1 日の基準作業量を達成するための 正味作業時間 (時/日)	V_i : 第 i 回間伐時の 1 ha 当り出材材積 (m^3/ha)
w : 作業員賃金 (円/日)	S_i : 伐区面積 (ha)
Δw : 1 日当りの作業量増加に対する加給 分 (円/日)	$P(L)$: 労務費単価 (円/ m^3)

- Y : 集材人工数 (人時)
 R : 機械の架設撤去人工数 (人時)
 T : Y と R の合計 (人時)
 w : 賃金 (円/人時)
 m : 集材作業人員 (人)
 $C_y(L)$: 平均サイクルタイム (時/回)
 V_t : 1 回当たり平均積載量 (m^3 /回)
 V_a : 1 伐区当たり総出材量 (m^3)
 $M_p(L)$: 機械損料 (円/ m^3)
 $F_u(L)$: 燃料油脂費 (円/ m^3)
 K : 集材機作業等における標準器材費 (円/ m^3)
 Y_s : 1 日の功程 (m^3 /日)
 k : 年間標準実働日数/年間標準供用日数
 CR_s : 機械の償却費率
 D_o : 年標準実働日数 (日)
 LY_s : 機械の耐用年数 (年)
 M_s : 機械の定期整備費率
 MT_s : 機械の現場修理費率
 MY_s : 機械の年間管理費率
 P_s : 機械の価格 (円)
 e : 油脂費その他の燃料費に対する比率
 FV_s : 機械の燃料消費量 (l /日)
 FC_s : 機械の燃料単価 (円/ l)
 RIG : 集材機作業等の標準器材費 (円)
 V_c : 同上平均耐用数量 (m^3)
 T_L : 荷掛時間 (時/回)
 T_U : 荷卸時間 (時/回)
 $T_{LU} = T_L + T_U$
 v_1, v_2 : 搬器または車両の平均走行速度 (往復) (m /時)
 v_1', v_2' : 平均横取速度 (往復) (m /時)
 α : 集材方向の伐区長/最大集材距離
 β : 伐区の中央幅/最大集材距離
 γ : 平均集材距離/最大集材距離
 n : 1 伐区当たりの架線本数 (本)
 k_1 : 架設人工数の L に対する比例定数 (人時/ m)
 k_2 : 撤去人工数の架設人工数に対する比例定数
 k_3 : 張替人工数 (人時)
 L_y : 残存立木の障害に対して横取可能な最大距離 (m)
 A : 残存立木密度 (本/ha)
 a : 立木の平均胸高直径 (m)
 d_t : トラクタ作業路密度 (m /ha)
 η : 作業路迂回率
 \bar{S} : 平均木寄距離 (m)
 G : 作業路作設費および木寄費の合計 (円/ m^2)
 r_t : 作業路の作設単価 (円/ m)
 C_t : 木寄の平均サイクルタイム (時/回)
 v'_1, v'_2 : ウィンチの往復木寄速度 (m /時)
 T'_{LU} : 木寄 1 回当たりの荷掛および荷卸時間 (時/回)
 V_{pt} : 木寄 1 回当たりの荷掛材積 (m^3 /回)
 C_{pt} : 木寄 1 時間当たりの費用 (円/時)
 θ : 林地傾斜
 ϕ : トラクタの登坂限界角
 C_p : 集材 1 時間当たりの費用 (円/時)
 $M_t(L)$: 1 時間当たり機械費・燃料費 (円/時)
 P : トラクタ積載量を満たすために必要な木寄回数 (回)
 V_p : 平均木寄能率 (m^3 /人時)
 η_s : 伐区外の作業路迂回率
 L'_B : 車両の運行と木寄能率がつりあう伐区内の距離 (m)
 L_B : 車両の運行と木寄能率がつりあう作業路上の距離 (m)
 C_{ts} : 伐区に到達するまでの伐区外走行の往復時間 (時/回)
 v_{1s}, v_{2s} : 伐区外における車両の往復走行速度 (m /時)
 V_a : モノレールの出材量 (m^3)
 k_4 : モノレールの路線 1 m 当たり出材量 (m^3 / m)
 k_5 : モノレールの路線 1 m 当たり架設撤去人工数 (人時/ m)
 Y_w : モノレールの路線間隔 (m)
 h : 上げ木集材の割合

- (1 - h) : 下げ木集材の割合
 添字 u, d : それぞれ上げ木集材, 下げ木集材を意味する。
- T_o : 木寄に関わる荷掛, 荷卸等の固定時間 (時/回)
- V_w : 単位面積当りの出材量 (m^3/m^2)
- Y : 伐区幅 (m)
- $T_p(n)$: 路線 1 m 当りの木寄・架設撤去人工数 (人時/m)
- V_{ptd} : 平均木寄材積 (下げ木の場合) (m^3 /回)
- L_B : 機関車の運行と積載量を満たすための木寄時間がつりあう運材距離 (m)
- k_6 : 循環索の架設撤去人工数に関する比例定数
- L_s : 伐区内循環索長 (m)
- k_7 : 人力木寄に関する定数
- W_r : 循環索 1 m 当りワイヤロープおよびブロックの費用 (円/ $m^2 \cdot m$)
- F_p : 人力木寄における材のけん引力 (kg)
- F_m : 人力木寄における限界けん引力 (kg)
- M_a : 全損料率
- P_r : モノレールのレール価格 (円/m)
- η_s : 循環索の屈曲率
- ρ : 燃料消費率 (m/ℓ)
- A : 対象面積 (ha)
- k : 開発伸長効率
- η : 林道の迂回率
- V_f : 林道 1 m 当り年間出材量 (m^3/m 年)
- L_i : 林道分岐点によって分割される林道の区間長 (m)
- ΣL_i : 当該区間を含めて当該区間より上流の区間長合計 (m)
- ℓ_i : 循環路を n 分割したときの各区間長 (m)
- u_i : 区間 i の空車時走行費用 (円/m)
- w_i : 区間 i の実車時走行費用 (円/m)
- V_{roK} : 区間 OK の年間通行台数 (台/年)
- V_{roM} : 区間 OPM の年間通行台数 (台/年)
- V_{rKM} : 区間 MK の年間通行台数 (台/年)
- v : 走行速度 (m/時)
- f : 15秒当り燃料消費量 (cc/15秒)
- S_m : 平均集材距離 (m)
- d_s : 作業道または作業路密度 (m/ha)
- V_{th} : 施業団地の間伐材総出材量 (m^3 /年 ha)
- r_y : 林道維持費 (円/年 m)
- r_s : 作業道または作業路の償却費と維持費合計 (円/年 m)
- S : 最大木寄距離 (m)
- V_w : 単位面積当りの年間平均出材量 (m^3 /年 m^2)
- $F(S)$: 木寄費と作業路費用の合計 (円/ m^3)
- R_t : 対象林地の間伐対象林の割合