

シミュレーションモデルを用いた 林道計画に関する研究

酒 井 徹 朗

Studies on planning method of a forest road in
mountainous region, using a simulation model

Tetsuro SAKAI

要 旨

数値地形図をベースとしたモデルを用い林道の開設をシミュレーションすることで、林道開設量と集材費の関係を求める方法について考察した。この方法では集材可能面積、集材費、開設費の評価値等が逐次出力されるので、適切な林道開設量や配置を比較検討し求めてゆくことができる。またその地域の林道密度と平均集材距離の関係が推定できるなど適用の途は広い。

は じ め に

林道計画をたてるにあたりまず第一に重要なことは、その林道の開設が森林施業や林地等と与える効果・影響を把握し、適正な開設量と配置を求めることである。そのために数多くの路線について比較検討し選定することが望まれる。路線選定に必要な建設費（土工量）、集材費の軽減、山地保全や環境への影響といった路線選定因子を人手により算定していたのでは限界があり不十分である。そこでより容易に数多くの情報を得るため、近年数値地形図を用い、林道計画をたてる研究が数多く行なわれてきている。これらの研究はある評価基準のもとで任意の地点を結ぶ評価値最小（最大）のルートを探索する方法に関するもの^{1),2)} 任意の路線の土工量を概略設計として数値地形図より算定するもの³⁾である。これらの研究では建設費や縦断勾配といった開設に関する因子を扱っており、集材費や林地到達時間の変化といった開設効果に関しては不十分である。一方数値地形図を用いて集材架線の架設位置や集材費を算定する研究⁴⁾とか、山地崩壊の危険度を推定する研究⁵⁾等が行なわれており、林道計画に必要な集材費や山地保全に関する情報を得るために数値地形図は有用な手段だと思われる。そこで地形的制限の強い山岳林の林道計画をたてる場合に、集材機集材による平均集材費や林道開設に伴う集材可能面積の増加等を算出し、それらを路線選定の一検討手段とする方法について考察したので報告する。

林道開設と集材費

林道の開設量と建設費の関係は容易に求めることができるが、開設量と集材費の関係を求めることは容易でない。というのは、集材費は集材距離の関数として表わされるが、開設量と集材距離の関係はその林道の配置により一概にいえないからである。MATTHEWS⁶⁾をはじめとする林道密

度理論では、平均集材距離は林道間隔の4分の1、林縁との距離の半分としている。また PENN⁷⁾は林道上に一定間隔で設けられた土場へ集材するものとして対象林地を面としてとらえ平均集材距離を求めている。これらのモデル計算は地形的条件による集材作業の可否を考慮せず、林道(土場)から一定の距離にある林分はすべて集材可能としている。この場合開設量と平均集材距離は反比例ないし指数関数的な関係となる。我国のような山岳林を対象とした林道計画では、集材方法として架線集材を考えるのが普通である。架線集材の場合、平地林のトラクタ集材やクレーン集材と異なり、地形的条件により任意の地点から架線集材可能な地域と不可能な地域に分れ、架設の可否が問われる。計画対象地域の集材を考える場合、この制約を無視することはできない。また林道そのものの路線も地形的制約をうけ迂回率で表現されるいわゆる無駄な部分が多くでくる。このように山岳林における林道開設量と集材費の関係は平地林のそれに比べ複雑である。

林道密度理論は対象地域の林道開設延長量をコスト面から推定しており、量的な面では役割を果たすが、林道開設に伴う経済効果や施業上のメリットを具体的に予測したり計量することには不十分であった。林道計画上これらのことは林道配置という質的な面からみて重要なことである。そこで個々の林道の全体計画を考える際、開設量と集材費あるいは平均集材距離がどういう関係にあるのか明らかにしながら、開設量と配置を林道の目的とその制約の中で決めてゆく必要がある。そのため個々の地形的条件、林分条件下で適切な林道開設量や配置をシミュレーションの手法を用い推定する必要がある。

シミュレーションの手法

1) モデル 対象地域の森林基本図をもとに格子点間隔20~25mの数値地形図を作成し、これをベースに集材費、開設費の評価等を算出する。林道通過地点及び集材地点としてこの数値地形図より格子点間隔の広いメッシュを作成し一連番号を付ける。その間隔は計算の精度、記憶容量、計算時間によるが経験的には50~100m程度が妥当と思われる。一方集材対象地は数値施業図として小班あるいは施業単位の周囲を平面座標で入力する方法もあるが、ここでは格子点で代表させた。

また、このモデルでは3通りの方法で林道の予定路線を入力することができる。第1は任意の路線を近接する格子点で近似し、その点列を入力する場合。第2は始点となる格子点と終点となる格子点を入力し、両格子点を結ぶ開設費の評価値が最小のルートを計算により探索する場合。第3は入力された任意の点(3コ以上)をループすることなく結び、その開設費の評価値の総和が最小のルートを探索する場合⁸⁾である。どの場合にも経路、開設費の評価値、集材可能面積、平均集材費、各格子点の集材費及び集材先(集材土場となる格子点番号)が出力される。第3番目の場合、入力される通過すべき点として当該林道とその他の公道や林道との連結点、他地域への連絡点、それに集材に有利な山土場予定地点等が選定される。前二者は容易に選定されるが後者の場合、格子点すべてを対象とし、その中から対象区域すべてが集材可能となる最小の山土場予定地の組合せを選択することは組合せも多く計算も大変である。また山土場として選定された点以外の林道通過地点でも集材可能であるからこれらを総合的に判断し最小集材費で最小開設費評価のルートを探索することは難しい。そこで各格子点の最小集材費の架線位置図を参考にしながら比較的有利と思われる地点を通過地点に選定し、それらを結ぶルートを求め評価し変更してゆく方法をとった。

2) 費用の評価

林道開設費の評価は図1のように点Pより8方向の格子点に林道開設するものとし式(1)で評価

値 (H_{pi}) を算定した。

$$H_{pi} = W_I \cdot W_G \cdot W_D \cdot DD_{pi} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで W_I , W_G , W_D はそれぞれ式 (2) より求まる縦断勾配, 斜面傾斜, 斜面方位の変化に関するおもみで, DD_{pi} は 2 格子点間の距離である。

$$W_I = \begin{cases} 1.0 & (I_{pi} \leq a) \\ (I_{pi} - a)^2 & (I_{pi} > a) \end{cases}$$

$$W_G = \begin{cases} 1.0 & (G_p + G_i \leq 2b) \\ (G_p + G_i) / 2b & (G_p + G_i > 2b) \end{cases}$$

$$W_D = \begin{cases} 1.0 & (|D_p - D_i| \leq c) \\ |D_p - D_i| / c & (|D_p - D_i| > c) \end{cases}$$

I_{pi} : inclination (%)

G_p, G_i : gradient (%)

D_p, D_i : direction (rad.)

a, b, c : constant

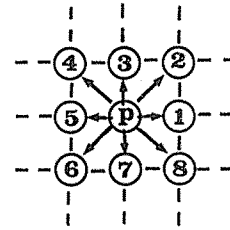


Fig. 1. Select of construction at mesh Point P

$\dots\dots\dots(2)$

開設費に関する評価方法は(1)式以外に様々あるが, ここでは地形に沿った無理のない路線という見地で土工量主体のものと少し異なる評価方法を用いた。

集材費の評価はエンドレスタイラー方式の架線集材で行うものとし算出する。垂下比・最大荷重・最大安全索張力・使用索の単位索自重・元柱や先柱の高さ・地表面との最小間隔等の因子を与え, 各格子点を山土場・集材点とする 2 点の組合せで集材架線を架設するものとし, その架設の可否を数値地形図を用い地表の縦断面と最大荷量時の荷重点の軌跡を求め決定する。この場合先柱・元柱を格子点に固定する方法と, 元柱を固定し先柱をその格子点間の線上に延長し最小スパンで架設可能な先柱の位置を求める方法, それと元柱も先柱同様反対方向に延長して架設可能地点を求める方法の 3 つが選択できるが, 後者ほど計算時間は増大する。この計算結果として, 集材地点・土場地点・スパン長・平均集材距離・高低差等が集材費ファイルに格納される。集材費はスパン長・支点の高低角・平均集材距離・集材材積・索自重・平均荷重・集材機出力等の因子により決まるが, 一般的には集材距離 (l) と集材材積 (V) との関数として近似できる。そこで式(3)で求められる 1 m^3 当りの集材人工数を集材費⁹⁾ (C) として求める。

$$C = 4.617l/V + 21.967/V + 1 / (6.841 - 0.379 \cdot l) \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3)式は 3 ~ 400m で最小値をとる下に凸な曲線である。この他の集材作業方法としてランニングスカイライン方式等の集材費を求め比較し安価な方を選び, ある格子点間の集材方法として集材ファイルを更新してゆくことも可能である。

3) 計算・比較

林道の開設は各格子間を結ぶ形で (図 1) 行なわれる。開設の難易・適否はそれらの格子間の開設費の評価値の和として相対的に比較することができる。n コの林道通過点 P_i ($i=1, 2 \dots n$) とそれ以外の点 $\bar{P}_i$ の組合せのなかで集材可能な組を集材費ファイルより探索し, それらのなかの最小集材費をもって格子点 $\bar{P}_i$ の集材費とする。通過地点 P_i の集材費は一定の値 (0.1 人/m^3) とする。平均集材費は集材可能な格子点と林道通過点の集材費より求め, 林道開設延長は通過格子点間の直線距離の総和とする。

路線の比較評価は次の 3 とおりで行うことができる。予定路線を比較する場合, 各々の路線を 1 つ以上の連続した点列として入力し比較評価する。このとき分岐している路線は複数の点列に

分割して入力する。

始点のみ決まっておりますどの程度林道を開設したら良いか検討する場合（特に突込み型の林道計画の場合）、始点を入力するとそれ以外の点に至る開設費の評価最小の路線が各々決まる。そこで任意の点を終点として入力し比較することで路線を決めることができる。またその地域の地形的条件による開設量（林道密度）と平均集材距離の一般的な関係がわかる。

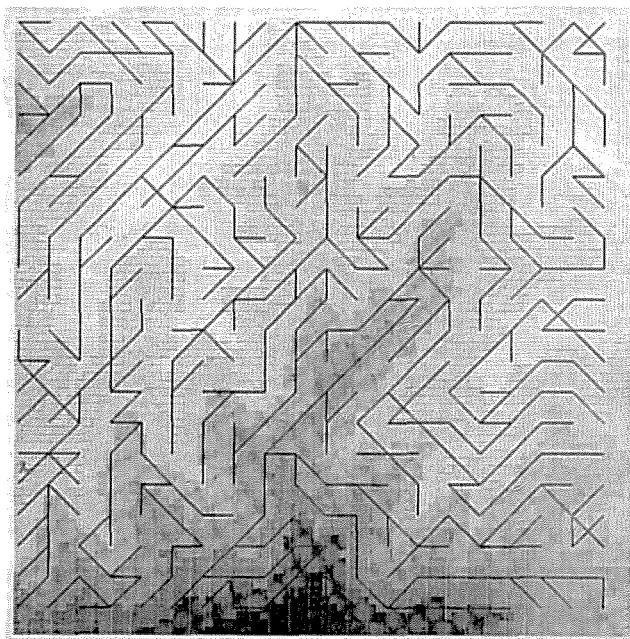
通過点のみが決まっている場合、それらの点を入力するとこれらの点をループすることなく結ぶ開設費の評価値総和が最小となる路線が求まる。その出力結果を参考にし不要な路線の削除や必要な部分の追加を行い、路網の適正化を計算機と対話しながら求めてゆく。この場合林道計画者の意図により配置は変化する。

これらの出力結果は容易にディスプレイ装置に図示されるので検討し易く、路線選定の基礎データとしてばかりでなく、利用区域や受益率・負担割合等の賦課算定にも有用であるし、開設順位・重要度のデータともなる。

適用例

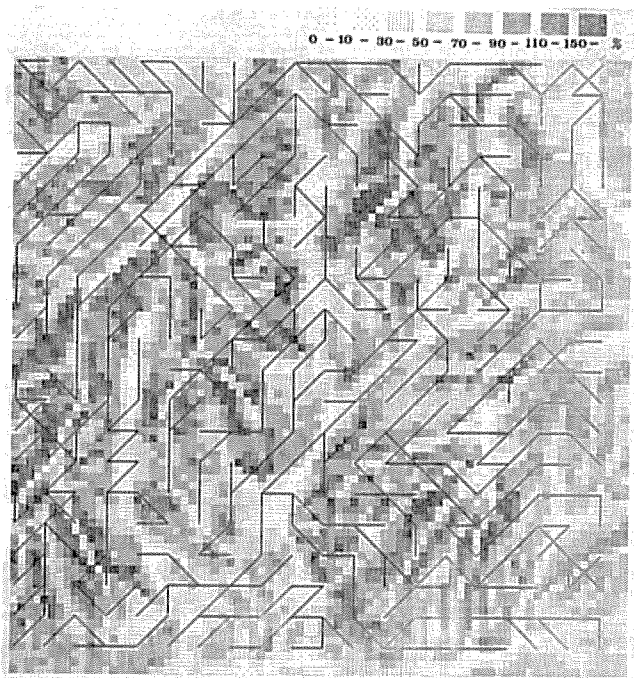
京都市左京区久多の民有林約700 ha を対象に作成した20 m メッシュの数値地形図のうち 256 ha (1600m 四方) を林道開設対象地域としてシミュレーションを行った。林道通過地点及び集材点として格子点間隔80m (20×20) の大きさで400点設定した。集材の可否は垂下比0.035, 荷重1 t, 索自重1.8 kg/m, 最大安全張力10 t, 最大スパン長1,000m, 先柱・元柱の地上高は同一でその位置は各格子点に固定するという条件で、一定間隔毎に荷重点の軌跡を求め、その位置の地表との差が1 m以上あれば架設可とした。

図2～図4は始点 P_0 を入力した場合他の各点への開設費の評価最小となるルート図である。



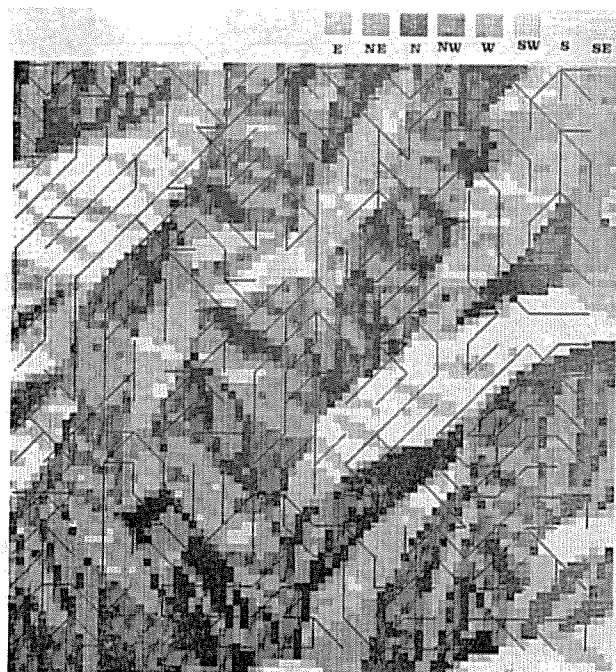
expression of construction value is equation (1) and (2), here
 $a=7$ (%), $b=50$ (%), $c=1.57$ (rad.)

Fig. 2. Location of forest road on minimum construction value at starting point P_0 (the gray map shows contour map - interval 50m)



expression of construction value is equation (1) and (2), here $a=5$ (%), $b=50$ (%), $c=1.57$ (rad.)

Fig. 3. Location of forest road on minimum construction value at starting point P_5 (the gray map shows angle of slope)



expression of construction value is equation (1) and (2), here $a=10$ (%), $b=50$ (%), $c=1.57$ (rad.)

Fig. 4. Location of forest road on minimum construction value at starting point P_5 (the gray map shows direction of slope)

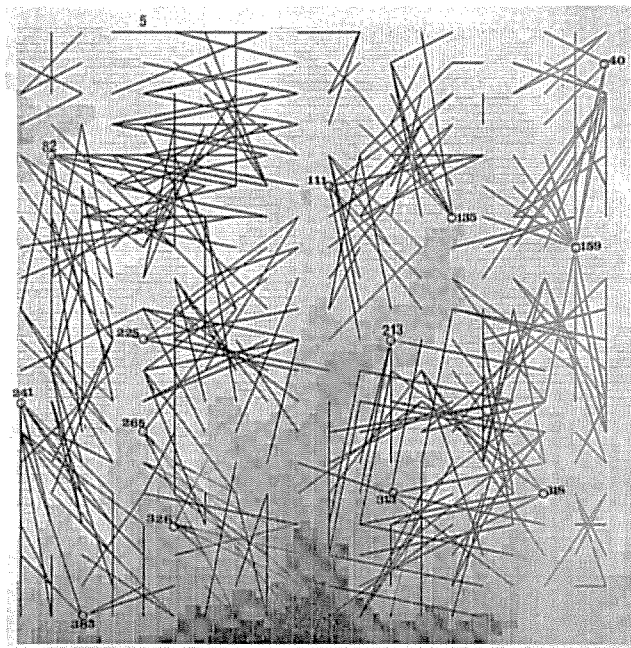
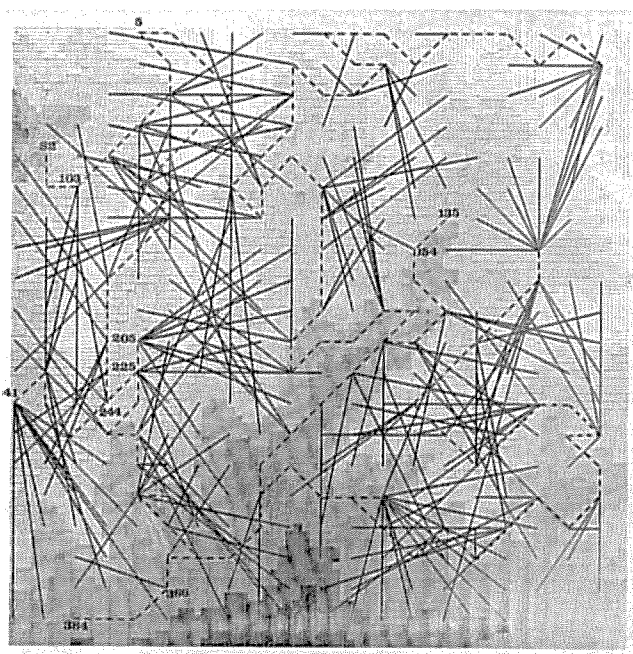
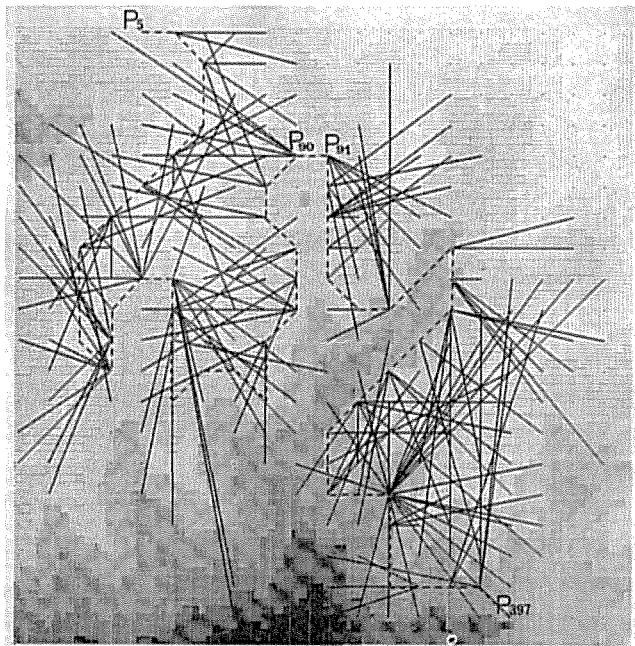


Fig. 5. Location of skyline for cable yarding on minimum hauling cost at each mesh point



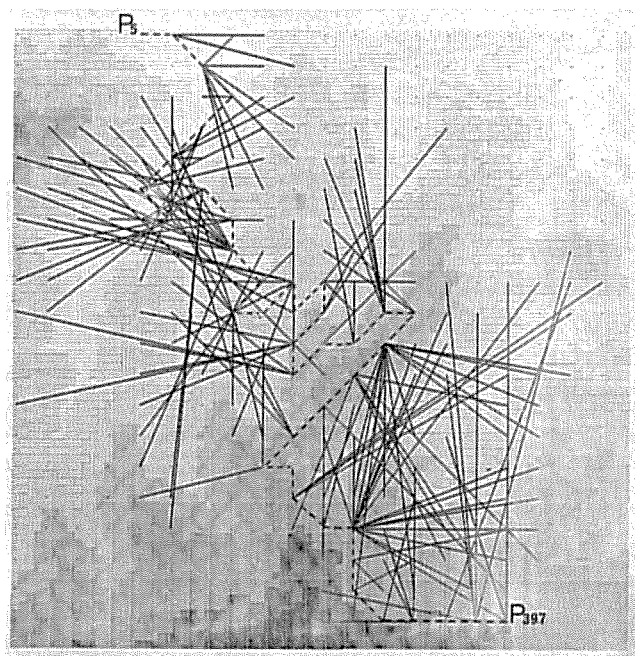
---- Road — Skyline

Fig. 6. Location of forest road and skyline when the points selected to pass are connected without loop on minimum construction value



----- Road — Skyline

Fig. 7. Location of forest road and skyline on planning route connected P_5 and P_{397}



----- Road — Skyline

Fig. 8. Location of forest road and skyline on minimum construction value between P_5 and P_{397}

評価関数（式(1)）の縦断勾配のおもみを変化させ、その影響をみたものである。勾配の基準を小さくし評価を高くすると距離を得るためヘーピン等が多くなるし、標高の高い部分への到達経路が変化してくる。またこれらの濃淡図はこの地域の地形的特色を表わしている。図2は50m間隔の等高区分を、図3は斜面傾斜区分を、図4は斜面方位を表わしている。

図5は各々の格子点から最小費用で架線集材する場合の架線位置図である。比較のもとになった架線は約6000本である。P₂₅₆等のように集材架線が集中している点は山土場として有利な位置にあり、林道通過地点として望ましい。図6は図5で選定された格子点と始点P₅とを開設費の評価値総和が最小でループすることなく結ぶ路網（破線）とその時の集材費最小となる架線位置を表わしている。この場合集材対象面積は230 ha、林道開設長は11,067m、対象面積に対する林道延長（以下林道密度という）48m/ha、集材費は搬出材積が100m³/haの時平均で0.240人工/m³（架線集材のみ0.304人工/m³）となる。またP₂₄₄—P₂₄₁やP₂₂₅—P₂₀₅等の支線を開設した時、延長は約800m増加するが対象面積は変化なく、平均集材費も0.003人工/m³減少するだけであるから開設に伴う効果は少いので削除の対象と考えて良い。

図7はP₅よりP₃₉₇へ抜けてゆく予定路線（破線）を入力し評価したものである。この場合集材対象面積159 ha、総延長5223m、林道密度32.8m/ha、平均集材費0.262人工/m³（搬出材積100m³/ha）、0.356人工/m³（同50 m³/ha）である。集材可能面積、平均集材費はP₉₀からP₉₁へ開設が進む時のように、違う谷筋へ移る毎に段階的に変化する。

図8は始点P₅からP₃₉₇に至る最小評価のルート（破線）を図2の評価関数で求めたものである。この場合集材対象面積124 ha、総延長3,849 m、林道密度31.0 m/ha、平均集材費0.267人工/m³（100m³/ha）である。予定路線（図7）に比べ対象面積で22%、延長で26%減、集材費で0.05人工/m³高である。この路線のどちらが良いかの評価は、その林道の主目的により変化する。

図9はこの対象地域の林道密度と平均集材距離の関係をプロットしたものである。林道密度が30m/haまでは、平均集材距離は減少するがそれ以上では横ばい状態である。このことはこの地域の地形的制約を考え

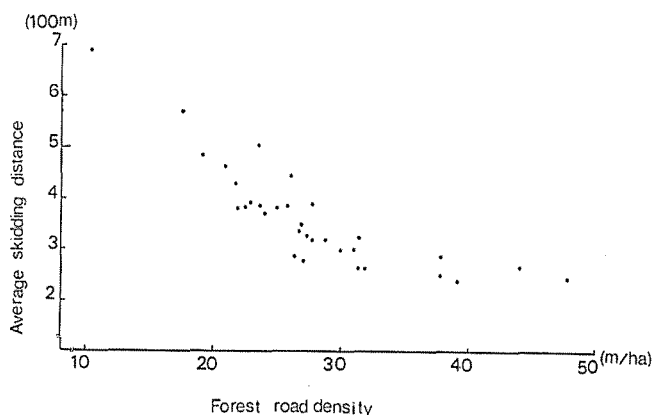


Fig. 9. Relation between the average skidding distance and the forest road density

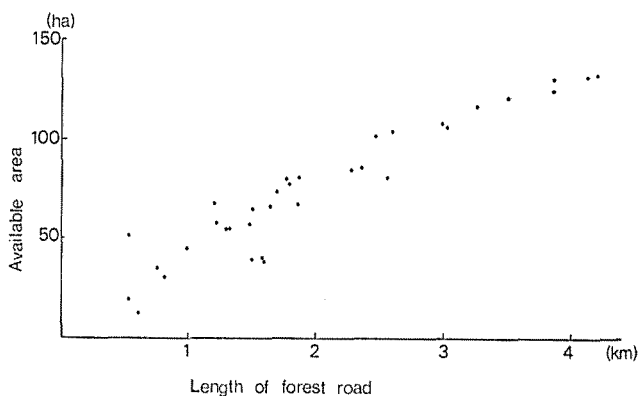


Fig. 10. Relation between the length of forest road and the available area

ると 30m/ha 前後までの林道を開設する場合に集材費の軽減に効果があるといえる。また平均集材距離300～500mの架線集材を行うとすれば林道密度は20～30m/ha 必要であるともいえる。ここでいう林道密度は受益地 1 ha が負担すべき林道延長量といいかえることができるので、m当りの開設費、補助割合等より負担の程度がわかる。

図10は林道延長量と利用面積の関係をプロットしたもので、ルートによって多少異なるが延長が延びるに従い利用面積の伸びが減少する傾向にある。

おわりに

林道計画における電算機の役割はいかに有用な資料を提供するかにある。ここでは電算機のもつ膨大な記憶量と計算能力を活用し、対話しながらシミュレーションを行い、適切なルートを選定してゆく方法について考察した。今後は林道開設が山地保全や、林木の成長に伴う諸々の保育作業とのかかわりについて分析できるよう機能を付加したい。また開設量と集材費（平均集材距離）との関係について地形による地域区分を行ないたい。

最後に本研究をすすめるにあたりいろいろと御教示をいただいた佐々木功教授に感謝の意を表し御礼申し上げます。なお本研究の一部は昭和55年度文部省科学研究費（奨励研究A）により行い、計算には京都大学大型計算センター及びその端末として本研究室のグラフィックディスプレイ装置を利用した。

引用文献

- 1) 小林洋司：電算機による林道路線選定の一方法，林試研報，No. 294，1977
- 2) 神崎康一：林道路線選定の数学的方法について，日林誌 56，p 415～424，1974
- 3) 酒井徹朗：数値地形図を用いた林道の概略設計について，92回日林講，1981
- 4) 大川畑修ら：集材架線の最適架設位置に関する研究，東大演報 67，135～157，1975
- 5) 梁瀬秀雄ら：崩壊危険地判定における地形計測法，89回日林講，p 391～392，1978
- 6) MATTHEWS, D.M. : Cost control in the logging industry. McGraw-Hill, N. Y. 374pp., 1942
- 7) PENN A. Petters: Spacing of Road and Landings to Minimize Timber Harvest Cost, Forest Sci., Vo.24 No. 2, 1978
- 8) 神崎康一：グラフの理論による林道設計法，日林誌 48，p 365～371，1966
- 9) 酒井徹朗：急傾斜地における搬出施設について(Ⅰ)，京大演報 No. 51，p 197～206，1979

Résumé

The relation between the length of a forest road construction and the hauling cost, is become clearer by the simulation of a forest road construction using digital terrain map (DTM). It becomes a very useful method to determine the length and arrangement of a forest road, especially in a logging plan of mountain forest. For, it is insufficient to apply the model of a tractor skidding, as Forest Road Density, to the case of a skyline-logging which is a usual logging method in a mountainous region, because the terrain condition often disturbs the setting up there.

The hauling cost of a skyline-logging that is determined by some conditions-load, maximum tension, clearance, power of yarder, etc., is calculated by the equation (3) which is a function of the skidding distance and felling volume, using DTM. The value of

a forest road construction is calculated by equations (1) and (2). Fig. 2 to Fig. 10 show the application of this simulation method. Talking with a computer about the location, we can determine the suitable forest road network according to the purpose of forest road construction.