

## 総 説

# 北米における伐出作業の功程及びコスト分析法

小 沼 順 一\*

## 1. はじめに

現在、我が国の林業は、外材や代替材との競合の中で低迷を続けており、木材生産の低コスト化が大きな問題となっている。林業の活性化を図るためにには、林業機械の開発や林道網の整備により生産コストの低減を図り、外材と対抗できる体質を早急に整備する必要があるといわれている。しかし林業機械の開発や林道網の整備には予想以上に時間がかかるものである。一般に一つの機械を開発するのに少なくとも10年はかかるといわれている。林道も現在、年間3,000km前後のペースで開設されているが、作業道を含め理想的な路網配置が完備するまでには、かなりの年月を要するものと思われる。

機械開発や林道建設と平行して速効的な期待がもてる現有機械の改良や作業法・作業仕組の改善あるいは作業者の技能の向上などに取り組む必要がある。このために実践側は、それぞれの現場における問題点を摘出し、生産性向上のための具体策を立てる必要がある。これに対し、研究側は現地調査法はもとより、より信頼度の高い作業能率あるいはコストの評価手法や新しい作業システム計画手法の開発に関する研究を進める必要がある。

我が国においても、これまでに作業研究やコスト分析、最適化などに関する多くの優れた研究成果が発表され、応用されているが、外国におけるこの分野の研究の現状を把握し、その応用及び発展の可能性を検討するため文献調査を行った。

1970年以降、アメリカ、カナダ両国で発表された文献の中で、入手したものについて瞥見の内容

を報告する。なお国内文献については、数多くの発表がなされているが、引用文献への記載はその一部にとどめたことをお断りする。

## 2. 時間分析と作業功程

作業の生産性やコストを評価するためには、作業量を把握するとともに、当該作業の作業時間を観測し時間分析を行う必要がある。対象は人の動きと機械の動きとがあり、機械化率の高い作業ほど機械を中心とした時間観測が行なわれている。

時間観測法については特に差違はないが、データの分析方法において我が国とは異なった方法が採られているので、以下、その相違点を中心に、作業時間の分析法、作業功程の計算法などについて検討する。

### (1) 単位作業と要素作業

時間分析に関する報告を見て、まず気付くことは、単位作業及び要素作業の分類が我が国に比べて1ランク大きいことである。単位作業は subsystem または function と呼ばれ、伐倒、造材、集材など我が国の工程に相当している。単位作業を細分化した要素作業は work element, element, activity などと呼ばれ、我が国の単位作業に相当する。チェーンソー造材作業に例をとると、我が国では、測尺、玉切り、木口回しなど8単位作業の下に、足場作り、普通玉切り、空身歩行など65の要素作業に分類した例が報告されている(63)のに対し、北米では造材単位作業の下に移動と枝払い、玉切りの2要素作業に分類(60)する程度である。これは我が国の場合、作業者の動作を基

\* 農林水産省林業試験場 Forestry and Forest Products Research Institute, Ibaraki 305

準に要素作業を設定しているのに対し、北米では作業のまとまりで区分しているためである。結果的に時間集計の基本となる要素作業の数が極端に少なくなる。参考までに、北米で採用されている要素作業を単位作業別に整理すると表-1のとおりである。

作業部分の時間である。後者は仕事の進行過程で不規則的かつ偶発的に発生する作業部分に消費される時間で、本来的には作業遂行上省略できない時間であるとされている。また、目的とする作業の遂行に直接関係のない時間を除外時間と呼んでいる。

表-1 サイクルタイムを構成する要素作業

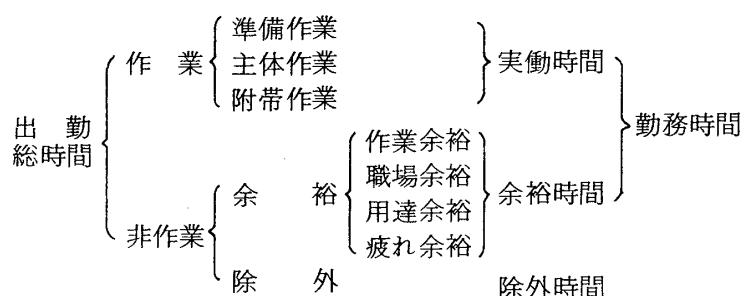
Cable	Tractor	Feller-buncher
Outhaul (Carriage out)	Travel empty	Move to tree
Lateral out	Manoeuvering	Swing empty
Hookup	(Winch out)	Position
Lateral in (Lateral yard)	Loading (Hook)	Shear (Fell)
Inhaul (Carriage in) (Deck)	Travel loaded	Swing loaded
Unhook (Road change)	Unloading (Unhook) (Piling) (Turn at landing)	Bunch
Off-road chipper	Grapple processor	Delimber-slasher
Travel empty	Swing to bunch	Moving
Positioning and motor start	Grasp tree	Extricate & load full trees
Chipping	Swing to pile	Delimbing & topping
Move between chipping	Process tree	Slashing & piling
Chipper shut down	Move	
Travel loaded		

一般に、要素作業をどこまで細かくとるかは、時間分析の目的によって異なるが、時間観測法とも関連し、今後検討を要する課題の一つである。

## (2) 余裕時間と遅れ時間

生産的仕事を行なう場合に、その仕事に熟練した作業員が、正しい方法で、通常の作業速度の下に遂行するため必要する時間を標準作業時間といい、その間に完成される仕事量を標準作業量と呼ぶ。標準作業時間は実働時間と余裕時間に分けられる。前者は作業の基本的な部分に消費される時間であり、通常仕事の進行過程で周期的に繰り返される

表-2 作業時間の分類(梅田, 1953)



我が国の国有林や国立林試は、この標準作業時間法を基礎に時間研究を行なっており、表-2に示す作業時間分類法にほぼ従っている。

これに対して北米では、余裕時間の代わりに遅

れ時間の考え方を探っている。作業遂行上必要な余裕 allowance ではなく、作業の遅れ delay 部分であるという考え方である。

図-1は MIFFLIN ら (46) の架空線集材に関する作業時間要素を示したものである。一部を修正すれば他の作業にも適用できるが、遅れはあくまでも非生産的時間であって、"ゆとり"を意味する余裕とは異なるものであることがわかる。

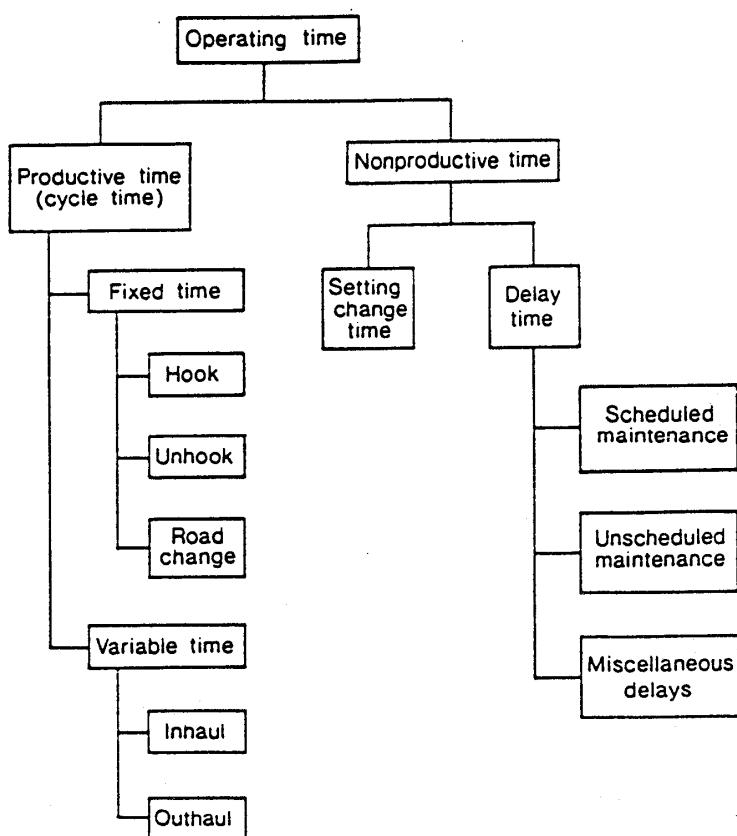


図-1 架空線集材の作業時間要素 (MIFFLIN ら, 1978)

一般に遅れ時間は次のように大分類される。

Mechanical delay	{ Repair Service
Non-mechanical delay	{ Personal delay Operational delay

- Mechanical delay は機械に起因するものであり、Non-mechanical delay は機械以外の原

因によるものである。Personal delay には休息、水飲み、遅刻・早退などが含まれ、Operational delay には材のかかり、仕事のやり直し、悪条件による遅れ、仕事待ち、打合せなどが含まれる。

遅れには、機械の点検整備や作業者の疲れに基づく休息など避けられない内容のものと、作業者の未熟さや過失、段取りの悪さ、相互連けいの悪さなどに基づくもので、努力次第で避けられる遅れがある。後者はいわゆる非生産的遅れであって、作業改善の標的となる部分である。我が国でも、小島 (32) は損失という用語を用い、止むを得ざる作業の遅れを不可避損失、作業者の責任に帰する遅れを可避損失として区分したが、この考え方と一致するものである。

遅れには一つのまとまった時間として観測されるものと、要素作業の中に混在するものとがある。カナダ林業工学研究所 (FERIC) では、遅れの観測を表-3に示す基準 (12, 13, 14, 37, 50) で行なっている。これによると、1回3秒 (5 cmin) 以下の遅れは分離せずに要素作業時間に含ませ、4秒から10分、場合によっては15分までの遅れを遅れとして記録し、それ以上の遅れは非生産的時間に入れている。生

表-3 遅れ時間観測要領

経過時間	処理方法
0 ~ 5 cmin	要素時間に含めて処理する
5 cmin ~ 10 (or 15) min	遅れ時間として記録する。
> 10 (or 15) min	生産的時間 (PMH) から除外する。

産的時間に整理された遅れは、我が国の余裕時間と同様、後述のサイクルタイムに按分されるが、非生産的遅れはサイクルタイムに算入されない。

遅れ時間の分析は作業改善の問題抽出につながるとともに、機械の改良点の発見にも有効である。機械操作の困難性とか作動の不正確さが作業の遅れとなって現れることがある。例えば FOLKEEMA(8) が行なった農用トラクタ用小型ウインチの時間分析では、ウインチラインの引出しの困難さが作業の遅れとして記録され、結果的に機械の改良点の指摘へとつながっている。ただ、遅れ時間の観測が作業の改善点や機械の改良点の指摘を目的とする場合は、生産的・非生産的の区分は経過時間の長短ではなく、その内容によるべきであろう。い

ずれにしても遅れ時間の取り扱いは時間分析上重要な意味をもつものである。

### (3) サイクルタイムと生産的時間

我が国の時間分析では 1 日の作業時間を把握することに主眼が置かれるが、外国ではサイクルタイムに重点が置かれる。サイクルタイムは、繰り返し実行される生産的作業の一単位を実行するに要する時間である。集材のように荷物の運搬を行なう作業では turn time あるいは turn cycle time, total time per turn などと呼ばれる。

サイクルタイムは当該単位作業を構成する要素作業の平均所要時間の合計に遅れ時間を按分して算出する。架空線集材の場合はさらに索の張替えに要する時間が按分される。図-2(43)は架空線集

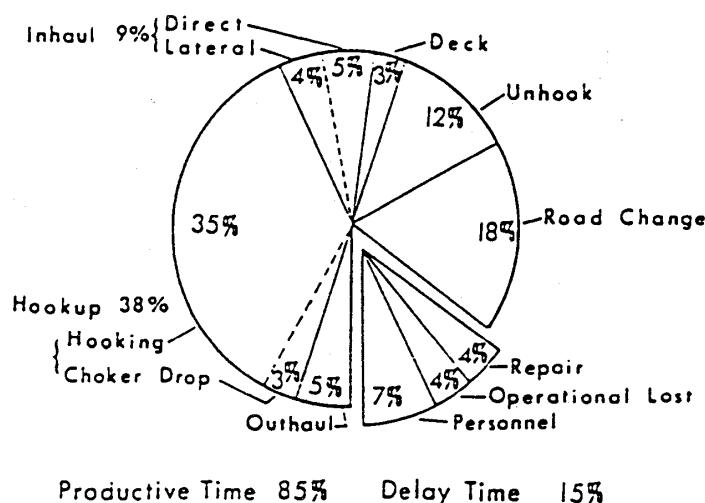


図-2 架空線集材作業のサイクルタイム  
(MCMORAND ら, 1982)

表-4 伐出作業の作業条件因子

区分	条 件 因 子
<b>環境条件</b>	
作業環境	傾斜度, 地表状況, 林道間隔(密度), 気象条件
作業対象	人天別, 樹種, 林令, 立木間隔(密度), 蓄積, 面積, 出材材積, 立木材積, 胸高直径, 樹高, 根株径
<b>制御条件</b>	
作業仕様	作業種, 材種(丸太, 全幹, 全木, パルプ材), 集材距離, 横取距離, 材の大きさ, 積荷本数, 積荷材積, 伐採率, 伐採量, 荷まとめ(bunch)量, 土場面積
作業手段	人力機械別, 機種, 機械性能(馬力, 速度), 作業機, ロープ径, 作業員数

材のサイクルタイムの構成を例示したものである。5つの要素作業に、按分した索張替え時間を加えて生産的サイクルタイムを出し、さらに遅れ時間を探してサイクルタイムとしている。

伐出作業のような野外作業の場合、作業環境や対象物など作業条件が不均一で、同種の繰り返し作業でも毎回結果が変動する。作業時間や功程に影響を及ぼすと考えられる条件因子を内外の文献からまとめると表-4のとおりになる。

これらの作業条件因子と各作業のサイクルタイムや要素作業の所要時間との関係を説明するために回帰分析が行なわれている。我が国では要素作業に関する回帰分析の例が多い(30,63,64,65,68)が、外国では単位作業のサイクルタイムに関する回帰分析が多い。

サイクルタイムの一次回帰分析では、トラクタ集材に関するもの(27,37,39)、架空線集材に関するもの(55,56)、プロセッサに関するもの(25)などが、また、重回帰分析ではトラクタ集材に関するもの(1,16,18)、架空線集材に関するもの(1,3,17,18,28,33)、バルーン集材に関するもの(18)などがある。要素作業と条件因子の関係では、トラクタ集材の各要素作業の所要時間を一次回帰分析したもの(27)、架空線集材の要素時間を一次回帰式で表わしたもの(3,55)、グラップルプロセッサ

の枝払作業で、全木材1本当りの処理時間とベースマシンの移動時間をそれぞれ一次回帰及び重回帰分析したもの(25)、あるいは、架空線集材の引寄せ時間を重回帰分析したもの(3)、トラクタ集材の各要素作業時間を一次回帰分析または重回帰分析したもの(2)などがある。

1日の作業を shift という。1 shift は 8 時間が普通であるが、9 時間、10 時間の場合もある。24 時間に内交代制で 2 shifts の作業を行なうこともある。1 shift の時間を scheduled (machine) hour といい、SMH または SH で表わす。SMH から非生産的時間を差し引いたものを productive (machine) hour といい、PMH または PH で表わしている。INCE ら(29)の PMH の考え方を式に表わすと次のようになる。

$$\text{PMH} = \text{SMH} - (\text{Delay time} + \text{Idle time} + \text{Move time})$$

ここで( )内の各時間は表-5のとおりであり、作業員の動きと機械の動きでわかりやすく説明されている。これによると、PMH は SMH から遅れ時間、休止時間及び作業地移動時間を差し引いた残りということになる。なお、SMH を scheduled on-site time、PMH を productive on-site time(28)、productive time を delay-free time(3)と呼ぶこともある。

表-5 作業時間分類と人・機械の動き (INCE, 1984)

Time	Crew	Equipment
Productive time	Present	Operating
Moving time	Present	self-propelled or hauled
Delay time	Present	not operating
Idle time	not present	not operating

1日の作業時間に関連して、カナダでは機械の稼動状況を表わす次の2つの指標が用いられる(5, 9, 10, 20, 40, 45, 50)。

#### Mechanical availability

$$= \frac{SMH - \text{Mechanical delays}}{SMH} \times 100$$

$$\text{Machine utilization} = \frac{PMH}{SMH} \times 100$$

前者は機械稼動可能率であり、SMHから、機械が故障や整備などで稼動できない時間を差し引いた時間のSMHに占める割合を示す。すなわち、1日の中で機械が稼動し得る状態にある割合である。機械稼動可能率が高いほど、故障が少なく機械の稼動性が良いことを示す。後者は機械利用率であり、この割合が大きいほど、1日の生産的時間が長く、機械が十分に利用されていることを示す。稀ではあるが、機械稼動可能率の式の分子を、

$$SMH - (\text{Repair} + \text{Service} + \text{wait parts} \\ + \text{wait mechanics})$$

としたもの(9,45)もある。一般に機械稼動可能率は集材機で70~95%, 枝払機で60~85%, また機械利用率はそれぞれ、60~85%及び55~80%程度である。

機械の休止率を示すものとして、次式が用いられることがある(45)。

#### Machine down-time ratio

$$= \frac{\text{Repairs} + \text{Service hours}}{PMH} \times 100$$

機械休止率が低いほど、機械の故障が少なく、稼動率の高い機械として現場に定着していることを示す。

#### (4) 作業功程と条件因子

時間分析の結果と作業量調査のデータを基に、単位作業別あるいは使用機械別の作業能率を評価する。

まず、1時間当たりの作業量すなわち時間功程を計算し、次に1日当たりの功程を計算する。1時間当たりの功程は、一般にPMH当たりで計算される。集材作業の1PMH当たり功程の計算には次式(3, 51)を用いる。

$$\text{Production rate} = \frac{60}{\text{Turn time}} \times \text{Turn volume}$$

ここで、Production rateは1PMH当たり功程、Turn timeは分単位、Turn volumeは積荷材積である。

作業功程あるいは労働生産性と作業条件因子との関係の解析については、我が国では回帰分析が普通に用いられており、さらに主成分分析(31)や数量化による要因分析(61)なども新しい手法として応用されている。北米ではサイクルタイムと条件因子との関係解析が中心であり、作業功程や生産性を直接回帰分析の対象とした例は少なく、上に示す計算式で間接的に計算するか、シミュレーションを利用して関係式を誘導している。引用文献のうち、作業功程の回帰分析を行なったものは、GIGENE(21)の一例のみである。ここでは、アキュムレータ付伐倒機の性能試験において、立木の根元径と、PMH当たり伐倒本数及び材積との間に、それぞれ1次及び2次の曲線回帰式を導いている。また、シェレーションを利用して作業功程と条件因子との回帰分析を行なったものとして、後述のLEDOUXら(36)の架空線集材に関するものがある。

功程計算の結果は数表(17,34,37)やグラフ(3, 21,28,36,39,50,52,60), ノモグラム(37)などに表現するとともに、次のコスト計算やシミュレーションに利用している。参考例として、図-3(37)に、FMC 200 グラップルスキッダについて、平均集材距離からSMH当たり功程を計算するラムを示す。

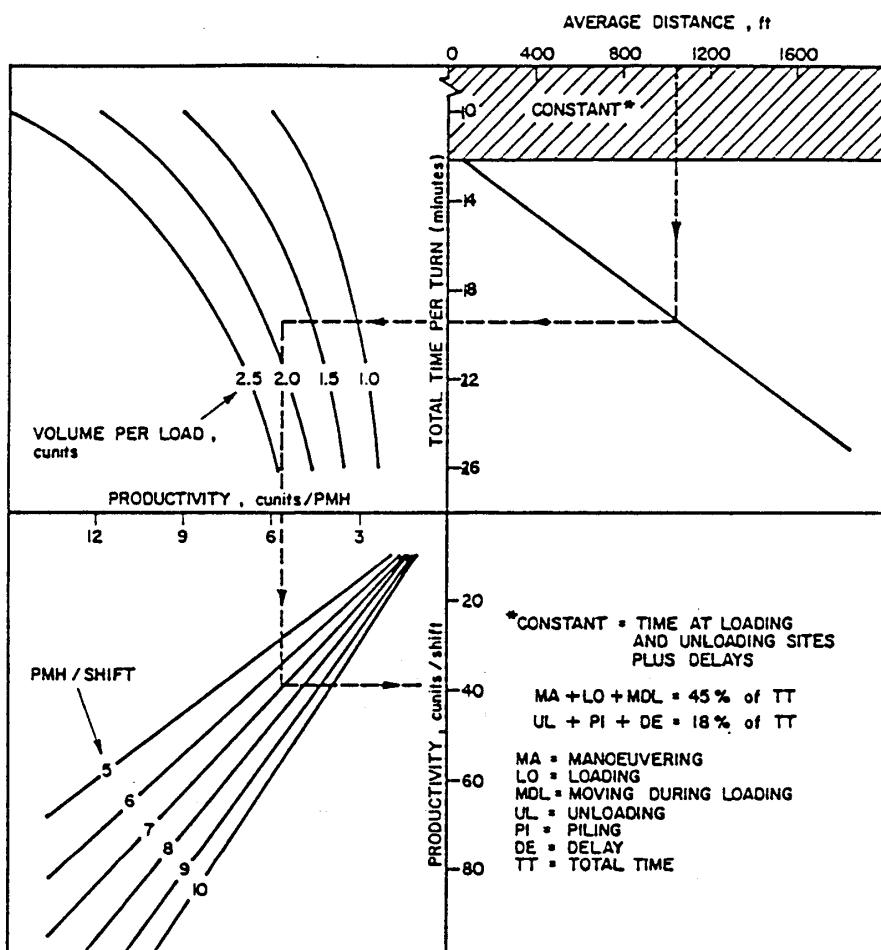


図-3 平均集材距離から1日当たり集材功程を計算するノモグラム  
(LEGAULTら, 1975)

### 3. コスト分析

伐出作業コストは、事業実行段階において、その成否の判定指標になるとともに、計画段階においては、伐出手段や方法選択の判断資料となるものである。作業計画研究の分野では、伐出作業に関するコスト算定の精度を上げるための努力が続けられており、前項の時間分析や功程把握の精度向上も、全て正確なコスト評価につながるものである。

伐出作業のコスト評価法については、我が国と大筋において差はないが、時間分析法に関連して多少特徴的な部分が認められる。

まず、コストの構成について、1978年ICMI-

FFLINら(46)が提示した架空線集材作業に関するコスト項目を図-4に示す。ここで、machine rateは単位時間当たり総作業費であり、Ownership costs及びOperating costsはそれぞれ固定費及び変動費(38)に相当する。また、SARLESら(51)やHUYLER(28)が用いているコスト分類法を図示すると図-5のとおりである。ここではMachine ratesは機械費であり、Labor costは別項目になっている。両分類共名称や構成に一部相異点があるが、内容的にはほぼ同一である。

固定費中の減価償却費は一般的に定額法により計算するが、残存価格を考慮する場合と、しない場合とがある。また、年間投資返済額として減価

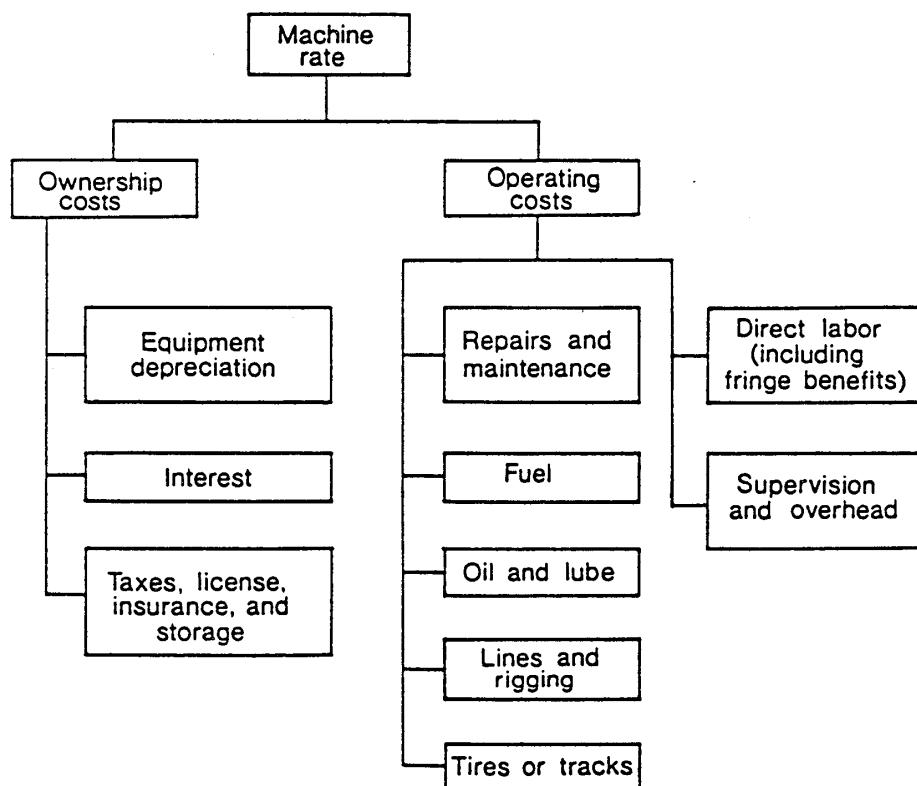


図-4 架空線集材作業コストの構成 (MIFFLIN ら, 1978)

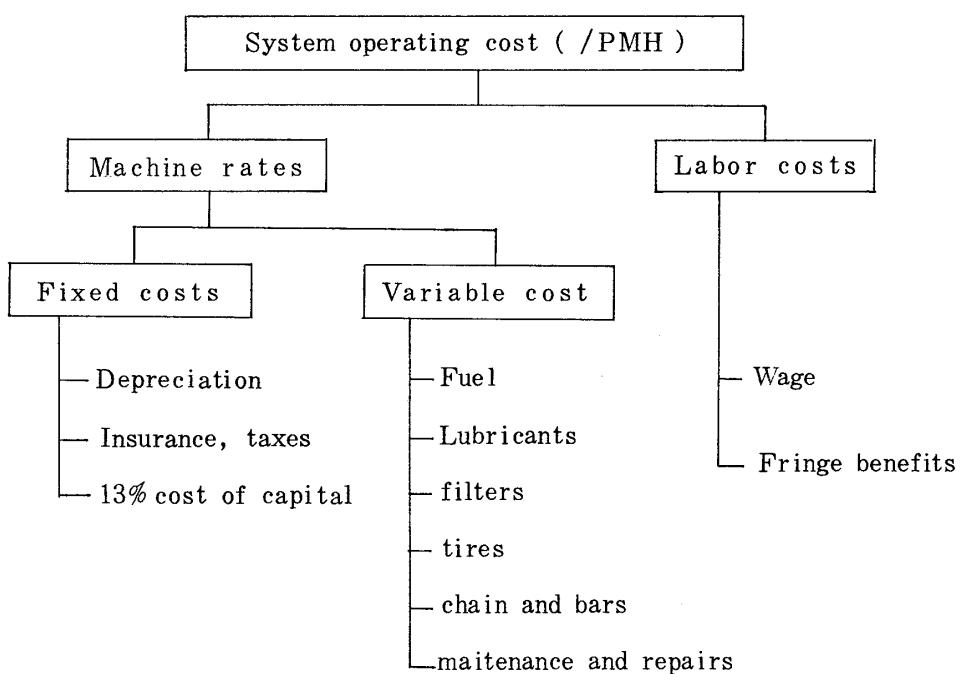


図-5 伐出作業経費の構成 (SARLES, HUYLER)

償却と資本利子を同時に考えて償却する場合は次式を用いる(29)。

#### Annual capital recovery

$$= (I - S) \frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + i S$$

ここで、  
I : 機械購入費

S : 残存価格

i : 利率

n : 債却年数

普通、残存価格 S は I の 10% (29,55)~20% (46) 程度を計上している。

維持修繕費の計算について INCE (29) では次式を提案している。

$$\text{Annual maintenance cost} = \frac{fI}{n}$$

ここで、f は maintenance cost factor 維持修繕費率であり、機種により次の値をとる。

チッパー、スキッダ、伐倒機 55 %

枝払機、積込機、ドーザ、トラック、トラクタ 45 %

#### その他の機械

50 %

燃料費や潤滑油費は既往の実績を踏まえて計算されるが、エンジン出力から燃料消費量を計算する方法もとられている。図-6(46)はディーゼルエンジン馬力から、負荷係数をパラメータとして燃料消費量を計算するグラフである。

以上の各経費を含め、単位作業あるいは伐出システム全体の作業コストを計算する。コスト算定の一般式(8,37)は次のとおりである。

$$C = \left[ \left[ \frac{I}{L} \left( 1 + \frac{i(n+1)}{2} \right) + M + W \right] \frac{100}{U} + F \right] \frac{1}{P}$$

ここで、C : 作業コスト (\$/m<sup>3</sup> PMH)

I : 機械購入費 (\$)

L : 耐用時間

M : 維持修繕費 (\$/SMH)

W : 労賃 (\$/SMH)

U : 機械利用率 (%)

F : 燃料費 (\$/PMH)

P : 作業功程 (m<sup>3</sup>/PMH)

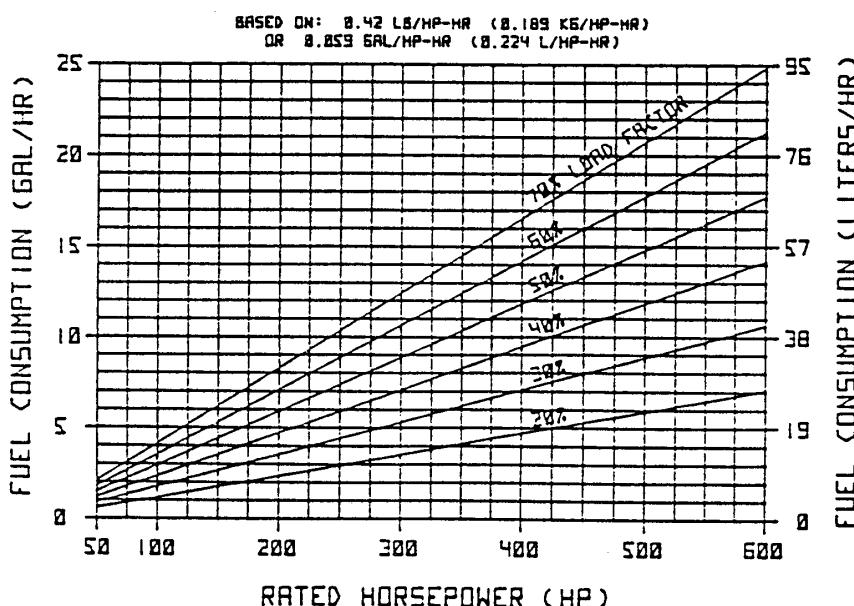


図-6 ディーゼルエンジン燃料消費量 (MIFFLIN ら, 1978)

得られた作業コストデータと作業条件因子との関係を解析した研究は我が国では例を見ないが、アメリカでは後述のコンピュータシミュレーションを利用して、作業コストの重回帰式を導いた報告がある。次式は FIGHT (7) がシミュレーションモデル "THIN" (33) を利用して誘導した架空線集材のコスト回帰式の一例である。

$$\begin{aligned} \text{COST} = & 737.4 - 61.09 (\text{DBH}) \\ & + 1.2926 (\text{DBH})^2 + 0.1497 (\text{SYD}) \\ & + 52.7 / \text{VOAC} \end{aligned}$$

ここで、COST：集材コスト (\$/MCF・PMH)

DBH：伐採木の平均胸高直径  
(inch)

VOAC：エーカ当り伐出量  
(MCF/acre)

SYD：平均集材斜距離 (foot)

この式は、大型集材機を用いて、胸高直径 18 ~ 24 インチ、エーカ当り伐出量 0.4 ~ 15 MCF

(注. 1 MCF = 28.3 m<sup>3</sup>)、集材斜距離 1200 フィートまでの集材を行なう場合に適用できる。作業の遅れ率を計算する式も同時に誘導されており、PMH 当りコストの SMH 当り換算などに使われる。次式は大型集材機作業の例である。

$$\text{抾伐の場合} \quad \text{Percent delay} = 22.9 - 2.61 (\text{VOAC}) \%$$

$$\text{皆伐の場合} \quad \text{Percent delay} = 9 \%$$

なお、この文献にはこの外、小型集材機、伐木造材、積込み、検知作業などのコスト計算式が報告されている。

伐出作業のコスト分析の結果は、数表(7,37)、グラフ(3,25,28,55,56,60)、ノモグラム(8,15,37)などで発表されている。一例として、図-7(56)は架空線集材のハイリード式とスラックライン式を比較し、目標コストを達成するために必要な作業功程を読み取るグラフである。同じハイリード式でも索張り時の不必要的な作業員を削減した場合

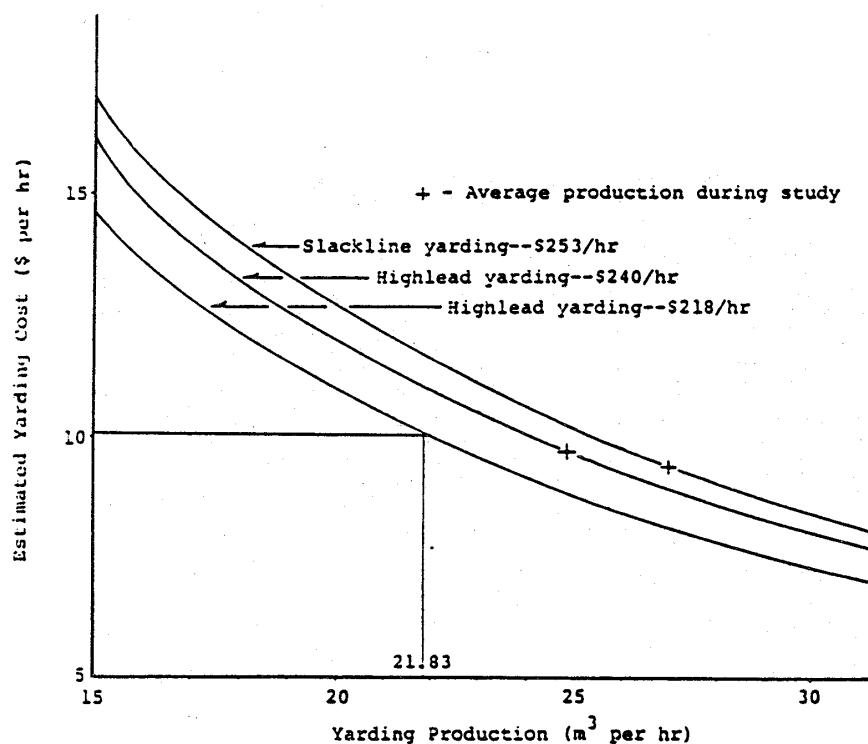


図-7 集材コストの索張方式及び集材功程に対する感度分析 (SAUDER, 1982)

(注. 図の下の曲線)の方が有利であり、その感度を読み取ることができるので、これを Sensitivity analysis と呼んでおり、他にも実行例(3)が報告されている。

コスト分析に関連して注目すべき研究成果として、GARDNER(18)が1982年に発表した、アメリカ北部ロッキー地方における過去15年間の伐出作業功程及びコスト分析の結果をまとめた総合的な報告書がある。

#### 4. シミュレーションの応用

1970年代の始めからコンピュータシミュレーションによる伐出システムの研究が盛んになり、多種のシミュレーションモデルが開発されてきた。その内容は、伐出作業の1工程を取り上げ、模擬的に作業を再現し、時間分析やコスト分析を行なうモデルから、各工程の縦の流れを結合して、より能率的かつ経済的な伐出システムを組立てるためのモデルや、目的生産物や生産手段を異にする多様な伐出システムを並列的に配置して、経営目的や作業環境に合致したシステムを選択するモデルまで様々である。シミュレーションは理論的な展開が困難な問題の解を求めるのに適した手法といわれている。伐出作業のように、作業諸条件とのかかわりで極めて複雑なシステムを構成している事業の運営問題の解明には有効な手段になるものと考えられる。ここでは時間分析やコスト分析用のモデルを中心に取り上げたが、入手文献が少なく、十分な検討ができなかったので、その概要を述べるにとどめた。

まず、1973年にSINNER(59)は、スラックライン式索張りによるダグラスファー若齡林の間伐材搬出作業についてシミュレーションを行ない、横取距離と集材功程の関係を解析した。現地調査で得たデータでは各要素時間や遅れ時間について十分な回帰分析ができなかったため、模式的に長方形の林分を想定し、立木密度や積荷材積、間伐

率などの条件因子を入れ換えて集材作業のシミュレーションを行なったものである。最終的に横取距離がサイクルタイムに最も大きな影響することを明らかにした。使用したプログラム言語はGPSSである。

GIBSON及びEGGING(6)は1974年に、ヘリコプタ集材の最適給油間隔に関するコストモデル及び土場の設置場所及び数に関するモデルを続けて発表している。このうち土場の位置に関するモデルについては、FORTRAN IV言語で書かれ、伐区の位置や箇所数、作業方法の特徴、土場作設費、作業費、林道の位置などに関する情報を入力し、伐区と土場の位置のあらゆる組合せを検討し、集材コスト、土場作設コスト及び運材コストを計算して、経済的に最も有利な土場の位置と航路を決定するモデルである。

以上2つのシミュレーションは、与えられた条件の下に結果が一意的に決まるいわゆる決定論的シミュレーションであるが、これに対して与えられる条件が確率変数あるいは確率分布関数であり、従ってその結果が確率的に変動する確率論的シミュレーションも広く応用されている。

BAREら(2)が1976年に発表したシミュレーションモデルは、アメリカ西部の林地残材の利用システムを評価するための確率論的モデルである。作業、集積、意志決定の3構成要素の組合せで、林地から仮の発電施設までの残材の流れを多数の組合せでモデル化し、ある集積地点から次の集積地点への材の移動を、使用機械によって決まる進度関数で制御するものである。各工程のサイクルタイムや非生産的時間、休止時間などに関する現地データは、確率分布関数の形で入力される。このシミュレーションの繰り返し計算で得られた功程やコストから、さらに平均値や分散を求めて、システム評価を行なうものである。

WINSAUER(66)は、伐倒機で荷まとめ(bunch)した全木材をグラップルスキッダで集材し、全木

チッパーでチップ化するシミュレーションモデルを1982年に開発した。モデルはタイマー部とスキッダ部とチッパー部の3部で構成され、タイマー部で1日のスケジュールを制御し、他の2部で作業のシミュレーションを行なう。現地調査に基づく林分データや機械類の性能に関するデータを確率変数形で入力し、変動幅内で値を変えながら計算が進行する。プログラムはGPSS言語で書かれているが、出力サブルーチンはFORTRANを使用しており、計算結果として各単位作業別の生産的時間や遅れ時間、作業功程などを出力する。計算は全て確率的に行われる所以、前記モデルと同様、毎回異なる結果が打出される。

GREENEら(26)は、小型伐倒機模型とInteractive simulation programを使って、林況や作業方法が小型伐倒機の間伐功程にどのような影響を及ぼすかについてシミュレーションを行なっている。皆伐用の伐倒材モデルは既に開発されていたが、間伐の場合は伐倒機の動きをプログラム化するのが困難であり、そのためモデルは未開発であった。このモデルでは、林況に関する条件因子として、1回目の間伐率、間伐前の密度、間伐後の密度を、作業仕様として、搬出路間隔、荷まとめ量(bunch sizes)などを取り上げ、手動の模型伐倒機を用いて、dezitizing padの上に敷いた同縮尺の林分地図上を操縦し、その動きをマイクロコンピュータに記録して、移動、切断、荷まとめなど各要素作業の所要時間の回帰式を誘導している。全伐倒作業のサイクルタイムは各要素時間の合計で求め、作業要因とサイクルタイムとの関係をSensitivity analysisで分析している。その結果、小型伐倒機の間伐功程には平均胸高直径とシェアヘッドの把持本数が最も大きい影響を及ぼすことを明らかにした。

LEDOUX(33)が1981年に発表した。架空線集材による間伐材搬出のシミュレーションモデルTHINは比較的利用度の高いモデルである。ア

メリカ北西部太平洋岸地方の間伐材搬出用の架空線集材方式について、時間と経費のかかるフィールド調査に代えて、経済的にシステム評価を行なう手段として開発されたものである。モンテカルロ法によるシミュレーションで、主言語にFORTRAN IV、データ入出力のサブルーチンにGASP IIを使用している。伐区上に分布する丸太を線下に適当な間隔で木寄せし、これを集材するという作業構成で、胸高直径や立木密度、集材効率、最大集材距離と横取距離、丸太の分布状況、木寄せ方法など各変数の組合せに対し、集材功程や集材コストがどのような影響を受けるかを計算するモデルである。

このモデルの応用例として、間伐材搬出時に1回の積荷材積を増加した場合の功程とコストに与える影響(34)、同じく、木寄せ地点の間隔や木寄せ方法が集材功程及びコストに与える影響(35)、あるいは、アメリカ北西部の間伐作業に利用されている代表的架空線集材方式の集材功程を求める回帰式の誘導(36)などが発表されている。

この外、アメリカで実用化されている伐出作業シミュレーションモデルの代表的なものは次のとおりである(22, 23, 24)。

APHSS (Auburn Pulpwood Harvesting Systems Simulator) : BUSSEL(1969)が開発したアメリカ南部のパルプ材収穫作業について作業条件別に作業功程及びコストを計算するモデル—FORTRAN。

FHSM (Forest Harvesting Simulation Model) : WEBSTER(1975)が開発したアメリカ南部の一般材及びパルプ材伐出作業の平均作業時間や作業功程を計算するモデル—FORTRAN/GASR II。

FTFC (Full-tree Field Chipping and Transport Simulation) : BRADLEY(1976)が開発した林内全木チップ化及び輸送システムの功程及びコストと、エネルギーの消費量及び生産

量を計算するモデル — GPSS/360.

HSS (The Harvesting System Simulator) : アメリカパルプ材協会 (1972) 及び O'HEARN ら (1977) が開発した最高 14 機種または 14 作業単位について最高 6 段階の単位作業まで種々の組合わせの伐出作業シミュレーションができる汎用的モデル — FORTRAN.

SAPLOS (Simulation Applied to Logging Systems) : BILLER ら (1973) 及び JOHNSON ら (1976) が開発したアメリカ南部における現行伐出システムのコスト計算や、新規機械の導入効果の判定、与えられた作業条件下での最適機械化システムの選定などができるモデル — FORTRAN/GASPⅣ.

THATS (Timber Harvesting and Transport Simulator) : MARTIN (1973) が開発したア巴拉チヤ地方の伐出システムについて、林道作設作業を含む各伐出工程の要素作業レベルまで詳細な計算ができるモデル — FORTRAN.

## 5. おわりに

今後の作業計画分野の研究は、個別作業の功程

調査やコスト分析にとどまらず、伐採からトラック運材まで、作業道の延長問題を含めて伐出作業全体をシステムとして分析し評価する方向に進展している。そのシステム解析の有力な手段として、複雑多岐にわたる問題の解決に最適なシミュレーションの手法がクローズアップされている。我が国においても、これを作業計画研究の分野に取り入れ、我が国の林業事情に適合したモデル開発の研究に取り組む必要がある。

精度の高いシミュレーションモデルを作成するためには、その基礎となる現地データの収集が必要であり、より正確で能率的なデータ収集法の開発も重要なテーマの一つとなる。また、時間分析においては、生産的時間と非生産的時間の区分法を採用し、特に余裕と遅れの区別を明確にして、作業改善や機械の改良につながる非生産的時間をできるだけ正確に摘出する調査法の確立が必要である。

林業工学部門における作業計画研究分野の今後一層の発展を願いつつ拙稿を終わりたい。

(1988.1.29. 受理)

## 文 献

- (1) AULERICH, D.E., K.N. JOHNSON and H. FROEHLICH: Tractors or skylines: What's best for thinning young-growth Douglas-fir ?, For. Ind. 101(12), 42~45, 1974
- (2) BARE, B.B., B.A. JAYNE and B.F. ANHOLT: A simulation-based approach for evaluating logging residue handling systems, USFS Gen. Tec. Rep. PNW-45, pp.30, 1976
- (3) BAUMGRAS, J.E. and P.A. PETERS: Cost and production analysis of the Bitterroot miniyarder on an Appalachian hardwood site, USFS Res. Pap. NE-557, pp.34, 1985
- (4) CONWAY, S: Logging practices , 378~400, Miller Freeman, San Francisco, 1976
- (5) COTTELL, P.L., B.A. McMORLAND and G.V. WELLBURN: Evaluation of cable logging systems in Interior B.C. and Alberta, FERIC TR-8, pp. 41, 1976
- (6) EGGING, L.T. and D.F. GIBSON: Helicopter logging: A model for locating landings, USFS Res. Pap. INT-155, pp.27, 1974
- (7) FIGHT, R.D., C.B. LEDOUX and T.L. ORTMAN: Logging costs for

- management planning for young-growth Coast Douglas-fir, USFS Gen. Tec. Rep. PNW-176, pp.10, 1984
- (8) FOLKEMA, M.P.: Evaluation of Farm-JL 30 logging winch, FERIC TR-12, pp.18, 1977
- (9) ————— and P. GIGUERE : The Koehring bunch limber: Long-term data collection from two operations, FERIC TN-43, pp.23, 1981
- (10) ————— : The Koehring Roll delimber: Longerterm data-collection from three machines, FERIC TN-44, pp.19, 1981
- (11) ————— : Evaluation of the Timberjack 30 delimber-slasher, FERIC TR-50, pp.18, 1982
- (12) ————— and R. LEVESQUE : Evaluation of the Hahn Pulp/Logger II limber-slasher, FERIC TR-52, pp.23, 1982
- (13) ————— : Evaluation of the Tanguay EC-200 delimber, FERIC TN-63, pp.21, 1982
- (14) ————— : Evaluation of the Cord King FM-50 firewood processor, FERIC TN-66, pp.25, 1983
- (15) GARDNER, R.B. and W.S. HARTSOG: Logging equipment, methods, and cost for near complete harvesting of Lodgepole pine in Wyoming, USFS Res. pap. INT-147, pp.15, 1973
- (16) ————— : Turn cycle time prediction for rubber tired skidders in the Northern Rockies, USFS Res. Note INT-257, pp.5, 1979
- (17) ————— : Skyline logging productivity used alternative harvesting prescriptions and levels of utilization in larch-fir stands, USFS Res. Pap. INT-247, pp.35, 1980
- (18) ————— : Estimating produc-
- tion rates and operating costs of timber harvesting equipment in the Northern Rockies, USFS Gen. Tec. Rep. INT-118, pp.29, 1982
- (19) GIBSON, D.F. and J.H. RODENBERG: Time study techniques for logging systems analysis, USFS Gen. Tec. Rep. INT-25, pp.32, 1975
- (20) GIGUÈRE, P.: Roger, Harricana and Logma delimiters: Long term evaluation, FERIC TN-42, pp.18, 1981
- (21) ————— : Short-term evaluation of the "A-Head" felling head with accumulator, FERIC TN-59, pp.14, 1982
- (22) GOULET, D.V., D.L. SIROIS, R.H. IFF, A. STUTTS and M.P. HAILEY: Harvesting simulation models — An evaluation and review for use in the Southern United States, IUFRO S3. 04.01 Proc. 127~136, 1978
- (23) ————— , R.H. IFF and D.L. SIROIS: Five forest harvesting simulation models I, For. Prod. J. 30(7), 17~20, 1980
- (24) ————— , ————— , ————— : Analysis of five forest harvesting simulation models II, For. Prod. J. 30(8), 18~22, 1980
- (25) GREENE, W.D. and B.L. LANDFORD: A grapple processor for plantation thinning, For. Prod. J. 35(3), 60~64, 1985
- (26) ————— , ————— and E.F. MYKYTKA: Stand and operating effects on feller-buncher productivity in second thinnings of southern pine: For. Prod. J. 37(3), 27~34, 1987
- (27) HOST, J and J. SCHLIETER: Low-cost harvesting systems for intensive utilization in small-stem Lodgepole pine stands: USFS Res. Pap. INT-

- 201, pp.20, 1978
- (28) HUYLER, N.K.: The costs and returns of the Vermont cable yarder, Nor. Log. & Tim. Pro. 35 (2), 12~18, 1986
- (29) INCE, P.J., J.W. HENLEY, J.B. GRANTHAM and D.L. HUNT: Costs of harvesting beetle-killed lodgepole pine in Eastern Oregon, USFS Gen. Tec. Rep. PNW-165, pp.26, 1984
- (30) 石井邦彦, 渡部庄三郎, 辻 隆道, 林業の標準功程表あてはめに関する研究(5), 林試研報 203, 33~129, 1967
- (31) 神崎康一: 伐採地の性格とその作業功程への影響(英文), 京大演報 36, 98~118, 1965
- (32) 小島幸治: トラクター集材作業に関する研究, 北大演報 22 (2), 375~537, 1963
- (33) LEDOUX, C.B. and D.A. BUTLER: Simulating cable thinning in young-growth stands, For. Sci. 27 (4), 745~757, 1981
- (34) \_\_\_\_\_ : How many chokers to fly in cable thinning? A question for simulation, For. Prod. J. 31 (11), 54~58, 1981
- (35) \_\_\_\_\_ and D.A. BUTLER: Prebunching? results from simulation, J. For. 80 (2), 79~83, 1982
- (36) \_\_\_\_\_ and L.W. STARNES: Cable logging production rate equations for thinning young-growth Douglas-fir, For. Prod. J. 36 (5), 21~24, 1986
- (37) LEGAULT, R. and L.H. POWELL: Evaluation of FMC 200 BG grapple skidder, FERIC TR-1, pp.23, 1975
- (38) MATTHEWS, D.M.: Cost control in the logging industry, pp.374, McGraw-Hill, New York, 1942
- (39) McDONALD, M.J., L.H. POWELL and D.W. MYHRMAN: Evaluation of Bombardier B-15 choker arch skidder and comparison with FMC 210 CA skidder, FERIC TN-21, pp.27, 1978
- (40) \_\_\_\_\_ : Development and evaluation of the critical site yarder, FERIC TN-31, pp.30, 1979
- (41) \_\_\_\_\_ : Evaluation of the Finning swing hydraulic yarder, FERIC TN-40, pp.28, 1981
- (42) McMORLAND, B.: Non-shearing felling heads, FERIC TN-34, pp. 48, 1980
- (43) \_\_\_\_\_ and A. WONG: Evaluation of the Model 9 Micro Master yarder, FERIC TN-54, pp.20, 1982
- (44) \_\_\_\_\_ : Trials of two feller-bunchers in Coastal B.C., FERIC TN-57, pp.20, 1982
- (45) \_\_\_\_\_ : Production and performance of mechanical felling equipment in Interior B.C., Timbco feller-buncher with rotosaw head, FERIC TR-67, pp.22, 1986
- (46) MIFFLIN, R.W. and H.H. LYSONS: Skyline yarding cost estimating guide, USFS Res. Note PNW-325, pp.19, 1978
- (47) 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. 1~87, 1970
- (48) PETERSON, J.T.: Comparison of three harvesting system in a Coastal British Columbia second-growth stand, FERIC TR-73, pp.50, 1986
- (49) POWELL, L.H.: Mobile chipper study: Processing logging residue for energy biomass, FERIC TN-61, pp.22, 1982
- (50) RICHARDSON, R.: Evaluation of

- Bruks off-road chippers, FERIC TR-71, pp.36, 1986
- (51) SARLES, R.L. and K.R. WHITENACK : Costs of logging in Appalachia using a truck-mounted crane, USFS Res. Pap. NE-545, pp.9, 1984
- (52) SAUDER, B.J. and M.M. NAGY : Coast logging: Highlead versus long-reach alternatives, FERIC TR-19, pp.51, 1977
- (53) \_\_\_\_\_ : Comparison of shotgun with highlead yarding, FERIC TN-18, pp.27, 1978
- (54) SAUDER, E.A.: An evaluation of grapple-crane yarding in Coastal B.C.: FERIC TN-36, pp.35, 1980
- (55) \_\_\_\_\_ : Grapple yarding with a steel tower, FERIC TN-53, pp. 36, 1981
- (56) \_\_\_\_\_ : An evaluation of highlead and slackline yarding with a Madill 046 yarder, FERIC TN-56, pp.32, 1982
- (57) SCHIESS, P., D. SCHUH and B. CARSON : Steep slope harvesting with the Kaiser X5M Spyder feller-buncher, Univ. Washington, pp.37, 1984
- (58) 白井良明, 柴田順一: 集材機作業サイクル時間(1)~(4), 機化林 189~192, 1969
- (59) SINNEN, H.-U.: Simulating sky-line yarding in thinning young forest, IUFRO Div. 3, 4 Joint meeting Proc., 82~106, 1973
- (60) STOKES, B.J. and B.L. LANFORD : Manual delimiting and bucking of bunched wood in thinnings, For. Prod. J. 37 (3), 23~26, 1987
- (61) 飛岡次郎: 非皆伐施業の集材システムに関する実証的研究, 三重大演報 11, 1~79, 1981
- (62) 辻 隆道: 林業労働の余裕に関する研究, 林専研報 122, 1~64, 1960
- (63) , 渡部庄三郎, 石井邦彦: 林業の標準功程表あてはめに関する研究(3), 林試研報 202, 1~132, 1967
- (64) 渡辺 茂, 白井 明, 辻 隆道, 桑原正明, 柴田順一, 上田 實, 渡部庄三郎, 石井邦彦: 伐木・造材・集材システムの最適化に関する研究, 林試研報 235, pp.205, 1971
- (65) 渡部庄三郎, 石井邦彦, 辻 隆道: 林業の標準功程表あてはめに関する研究(4), 林試研報 203, 1~32, 1967
- (66) WINSAUER, A.: Simulation of grapple skidders and a whole-tree chipper, USFS Res. Pap. NC-221, pp. 37, 1982
- (67) 梅田三樹男: 林業の作業研究, pp.134, 朝倉, 東京, 1953
- (68) 米田幸武, 中村英穎, 辻 隆道, 渡部庄三郎, 石井邦彦: 林業の標準功程表のあてはめに関する研究(2), 林試研報 149, pp. 229, 1963