

# ハーベスタ・フォワーダによる間伐作業の作業能率

酒井秀夫\*・岩岡正博\*・朴 相俊\*\*・小林洋司\*

## Operational Efficiency of Thinning with a Harvester-Forwarder System

Hideo SAKAI\*, Masahiro IWAOKA\*, Sangjun PARK\*  
and Hiroshi KOBAYASHI\*

### 1. はじめに

平成2～6年度にわたり、北海道宮林局恵庭宮林署管内において、ハーベスタとフォワーダによる作業システムについて継続調査を行ってきた。この調査は高性能林業機械の作業システムについて全国素材生産業協同組合連合会が林野庁の委託を受けて行ってきた調査の一環である(4～7)。平成2,3年度は主に機械の労働生産性と生産コストの調査を行った。平成4年度は林地への影響、残存木の損傷、販売面での調査を主体に行った。平成5年度は本作業システムを導入してから5年経過したのを機に作業の見直しを行い、マニュアルの作成とシステム改善の提言がなされた。平成6年度は本格的導入に向けて標準作業工程の作成を中心に検討が行われた。

本論は、これらの成果のうち、ハーベスタ・フォワーダによる間伐作業の作業能率に関して、時間分析結果から理論的検討を行ったものである。

販売は立木処分であり、事業実行は坂本木材株式会社である。資料の収集、調査の遂行に際しては、札幌地方製品生産業協議会城地 明専務理事、全国素材生産業協同組合連合会寺崎誠作専務理事に負うところが大きい。時間観測、資料の整理に関しては、東京大学森林利用学研究室大学院生・研究生有賀一広、北村 純、永井芳郎の各氏に協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

### 2. 機種および従来の作業の概要

従来の作業の概要を表-1に示す。機種はハーベスタがシングルグリップ式のバルメット935(ヘッド)、同996(アーム)、ベースマシンは日立EX120であり、フォワーダが及川自動車RMF-6WDである(写真-1, 2)。ハーベスタのアームはテレスコピックタイプで最大リーチが9.65mであるため、列状間伐をしながら残存列内の各立木に対して直線的にヘッドを持っていくことができる。したがって、林間の定性間伐も可能である。伐採方式は年度によって異なるが、列状間伐しながら林間を定性間伐する方式を本報告では「列状・定性併用間伐」と呼称し、列のみを伐採する列状間伐と区別することにする。なお、伐採列は必ずしも植栽列である必要はなく、一定のラインに沿って作業する方法もある。調査対象地はいずれの年度も適潤性未熟火山灰土で

\* 東京大学農学部林学科  
Department of Forest Science, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo.

\*\* 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻  
Department of Forest Science, Graduate School of Agriculture and Agricultural Life Sciences, The University of Tokyo.

表-1 ハーベスタ・フォワードシステムでの生産性の推移  
 Table 1. Harvester/forwarder thinning system; productivity changes

年度	平成2年度	平成3年度	平成4年度	平成5年度	平成6年度	傾斜地
林相	30年生カラマツ 人工林 5°	27年生トドマツ 人工林 2~10°	31年生カラマツ 人工林 5°	41~42年生カラマツ 人工林 5°	37年生カラマツ 人工林 6°	
平均傾斜	単木定性間伐 (前回1伐9残 伐採列を利用)	1伐3残列間伐 (4条植の端を伐る)	定性間伐 (前回1伐7残 伐採列を利用)	列状・定性併用	列状(伐採幅5m, 残存幅20m, 2伐7~8残に相当)	7°
伐採方式						
立木m <sup>3</sup> 廻り	0.14 m <sup>3</sup>	0.11 m <sup>3</sup>	0.16 m <sup>3</sup>	0.32 m <sup>3</sup>	0.23 m <sup>3</sup>	—
間伐率(本数)	16%	29%	24%	27.2%	22.7%	0.24 m <sup>3</sup> 29.6%
間伐率(材積)	20%	28%	16%	25.7%	21.0%	22.6%
人員配置	2人	2人	2人	3人	3人	
平均集材距離	120m	500m	320m	300m	395m	
労働生産性(日報)						
ハーベスタ	12.4 m <sup>3</sup> /日・台	22.6 m <sup>3</sup> /日・台	15.1 m <sup>3</sup> /日・台	28.5 m <sup>3</sup> /日・台	18.62 m <sup>3</sup> /日・台	27.25 m <sup>3</sup> /日・台
フォワーダ	24.2 m <sup>3</sup> /日・台	34.9 m <sup>3</sup> /日・台	20.4 m <sup>3</sup> /日・台	42.7 m <sup>3</sup> /日・台	33.0 m <sup>3</sup> /日・台	27.25 m <sup>3</sup> /日・台
総合	6.7 m <sup>3</sup> /人日	13.7 m <sup>3</sup> /人日	6.8 m <sup>3</sup> /人日	13.1 m <sup>3</sup> /人日	9.74 m <sup>3</sup> /人日	11.6 m <sup>3</sup> /人日
生産費	10,171 円/m <sup>3</sup>	9,051 円/m <sup>3</sup>	13,601 円/m <sup>3</sup>	7,988 円/m <sup>3</sup>	8,361 円/m <sup>3</sup>	7,661 円/m <sup>3</sup>
従来システムに対する	122%	63%	58%	—	59%	59%
生産費の比						
備考	グラップルローダ による選別補助なし	同左	グラップルローダ による作業補助	副作業*に グラップルローダ導入	グラップルローダによる作業補助	

\* 伐根処理, 作業路整備, 山床・土場での材整理.



写真-1 ハーベスタ.  
Photo. 1. The harvester.



写真-2 フォワーダ.  
Photo. 2. The forwarder.

水はけが良く(3), 平均傾斜も  $6^{\circ}$ 以下と平坦に近く, 機械の走行条件は良好であった。ハーベスタのオペレータも年度を通じて同一人である。

平成2年度はシステムの導入当初で, ハーベスタがフォワーダのために集積(パンチング)を

行ったり、フォワーダ走行路確保のために枝条を敷き並べたりしたために、ハーベスタ本来の作業である伐木造材に集中できず、コスト節減には至らなかった。平成3年度はグラップルおよびハーベスタヘッドの操作技量も向上し、フォワーダも積込み時にシートを後ろ向きに回転できるように改良されたので、労働生産性は1日実働6時間としてハーベスタが25.95 m<sup>3</sup>/日・台、フォワーダが47.45 m<sup>3</sup>/日・台となった。生産費も9,051円/m<sup>3</sup>と、チェーンソーとトラクタ全幹集材による従来型の生産方式に比べて37%の節減と評価され(4)、本作業システムの生産性に関しては一応実証された。

平成4年度作業は、昭和37年に2,500本/ha(1.8m間隔)で植栽した31年生カラマツ700本/haを定性間伐した。7年前に1伐7残で列状間伐を行っており、前生樹の伐根の他に伐採列の跡に広葉樹が更新してきているため、ハーベスタのオペレータがグラップルローダ(ベースマシンは日立EX120)でこれを除伐しながら事前に整備して、ハーベスタの林内作業路とした。ハーベスタの車幅2,500mmが列状間伐の伐採幅におさまり、立木密度も低かったため、列縁木に接触せずに旋回作業ができ、残存木の損傷はなかった。材は材長3.65mの梱包材向け一般材、2.8m材(品質によってパルプ材と用材に分けられる)、2m材に分別された。定性間伐のため、赤いスズランテープを巻いて伐倒木を指定していたが、作業が紅葉時期であると目立たず、伐倒木の捜索・確認に手間取る場合も少なくなかった。また、カラマツの立木密度が林齢の割に低く、林内の雑木の整理も行ったので、その分ハーベスタの工期が落ち、労働生産性は1日実働6時間としてハーベスタが14.64m<sup>3</sup>/日・台、フォワーダがこれに応じて17.64m<sup>3</sup>/日・台となり、総合して6.81m<sup>3</sup>/人日であった。コストも13,601円/m<sup>3</sup>と前年度の1.5倍となっている。従来型の生産方式による労働生産性およびコストは1.68m<sup>3</sup>/人日、23,322円/m<sup>3</sup>と推定され、条件の厳しい現場であったことがうかがわれる。

平成5年度の現場は、昭和26、27年に2,500本/ha植栽したカラマツを昭和49年に1伐4残で列状間伐し、昭和61年に定性間伐を行ったが、広葉樹が侵入して前回の伐採列も不明確となっていた。伐採幅4mではハーベスタが旋回時に機械後端が林縁木に引っかかることから、20m間隔で伐採幅5mの列状間伐を行い、林間を定性間伐した。採材は3.65m(杭丸太、一般材)、2.7m(径級9~13cm杭丸太)、2.4m(一般材)、2.3m(カラマツ・広葉樹パルプ)、1.8m(一般材)の5種類であった。径級によって採材寸法が変わり、1本の木から多数の製品が分かれるので、製品が散在しており、コスト増の原因となっていた。そのため、グラップルソーを1台チャーターし、フォワーダで集材する前にハーベスタで処理された材を製品ごとにさらに整理していた。グラップルソーは今後、皆伐で太い材を玉切るときに備えて検討されたものである。本作業システムではフォワーダ運材作業の方が一般的に余裕があるので、全体の作業能率をあげるためには、ハーベスタ本来の作業である伐木造材の生産性をできるだけ引き上げる必要がある。グラップルによる補助がないと、ハーベスタは材を置くのに分かりやすいように製品によって向きを変えたり、離したりしなければならず、そのために細かな移動等の付帯作業も増える。グラップルソーの役割が大きいものとなっていた。また、グラップルソーは土場でも整理等の補助作業を行っていたので、フォワーダは荷下ろし後、直ちに先山に戻っていくことができた。林地等の作業条件が良く、立木m<sup>3</sup>廻りが大きかったことから、ハーベスタの労働生産性は28.5m<sup>3</sup>/日・台と前年度の2倍近くになり、フォワーダと総合して13.1m<sup>3</sup>/人日であった。グラップルソーを1台配置しても全体のコストは7,988円/m<sup>3</sup>と前年度の59%であり、グラップルソー導

入による全体のコストへの影響は少ないものと推測された。

平成6年度現場は、昭和31年植栽のカラマツを昭和54年に1伐4残で列状間伐し、昭和61年に定性間伐を行ったが、広葉樹が侵入している。前回の列状間伐の筋に対して直角に20m間隔で伐採幅5mの2伐7~8残の列状間伐を行い、林間を定性間伐した。平成6年度もグラップルソーを1台チャーターした。5度以下の林地が56%を占め、地形は全般に平坦であったが、傾斜地にも調査地を設定して、平坦地との比較を行った。傾斜試験地は最大15度であるが、平均勾配は7度であった。ハーベスタの走行にとって根株や小径木による支障がややあり、ウルシ、ミズキ、イタヤカエデ、高さ1.2m位のカシワの稚樹があったが、ササはなかった。パルプ材の市況が良くないので、採材はカラマツ3.3m一般材(径級9cm以上)、2.2m一般材(16cm以上)、2.2mパルプ材、2m一般材(9~16cm)、広葉樹パルプ材と、パルプ材となるのを極力少なくするように製品の多様化を図っていた。ハーベスタの労働生産性は $18.62\text{ m}^3/\text{日}\cdot\text{台}$ となり、フォワーダと総合して $9.74\text{ m}^3/\text{人日}$ であった。コストは $8,361\text{ 円}/\text{m}^3$ と、従来の作業方式で想定されるコストの59%と評価された(7)。従来の作業方式に対するコストは、導入当初の平成2年度を除くと60%前後で落ちついている。傾斜地でのハーベスタの労働生産性は $27.25\text{ m}^3/\text{日}\cdot\text{台}$ と全体平均よりも高いが、傾斜地では列間の定性間伐をしなかったためである。

なお、平成5年度の収穫調査は全数調査であったので、材価が安い間伐材に対して調査費が相当な部分を占めていたが、平成6年度はサンプリング調査によって省力化を図った。方法は伐採木を全木表示し、その中から抽出して毎木調査し、全体数量に換算している。また、検知も出石による1回だけの発送検知とし、簡素化を図っていた。

作業の時間観測を1994年10月17日に行い、1995年1月12日~1月17日に行われた傾斜地試験については日報をもとに功程分析を行った。

### 3. ハーベスタの作業能率

#### 1. 平成6年度作業の時間観測結果

ハーベスタの要素作業の時間観測結果は表-2のようになった。観測時間は5時間49分21秒である。伐採列の左右に51箇所の玉材の集積場(パンチ)が形成された。ここでは、この集積場に対する作業範囲をハーベスタの1回当たりの作業範囲とする。伐倒本数はカラマツ139本、広葉樹14本の計153本であり、作業範囲1箇所当たり3.0本となる。また、処理した灌木が39本あった。

枝払い時間は、材に曲がりがあったり、材長を見たり、測尺をやり直したりするときに、材を送材ローラで戻したりするので、必ずしも樹高に比例しない。カラマツでは1本当たり平均34.7秒、広葉樹では13.6秒であった。

玉切り回数は採材方法にもよるが、測尺をやり直すときに切り直したりするので、必ずしも材長や製品数に比例しない。時間は瞬時であり、カラマツでは立木1本当たり平均5.6秒、広葉樹では2.5秒であった。なお、造材は2本伐倒してからまとめて行うことがある。

灌木は、ハーベスタで鋸断する他に、引き抜いたりする。

移動には、1)伐倒木に接近したり、安全有利な場所で造材したりするための作業範囲内の小移動、2)伐採列内で作業範囲を移すための移動、3)伐採列を変えるときの作業道上の移動、4)土場への移動等がある。1)の小移動はアームのリーチによっても異なる。2)が1)を兼ねることもあ

表-2 ハーベスタの要素作業時間  
Table 2. Harvester average element working times

要素作業	観測時間 時 分 秒	サンプル数 回	1 回当たり 秒	1 本当たり 秒
[カラマツ 139 本]				
ヘッド当て	29:20	137	12.8	12.7
鋸断	4:59	139	2.2	2.2
倒し	17:13	123	8.4	7.4
枝払い	1:20:17	538	9.0	34.7
玉切り (サルカ落としも含む)	13:02	575	1.4	5.6
つかみ直し	3:26	23	9.0	1.5
後処理	8:33	73	7.0	3.7
メジャー計測	1:59	1	119.0	0.9
小計	2:38:49			68.55
[広葉樹 14 本]				
ヘッド当て	3:00	14	12.9	12.9
鋸断	21	14	1.5	1.5
倒し	1:01	6	10.2	4.4
枝払い	3:10	21	9.0	13.6
玉切り (サルカ落としも含む)	35	27	1.3	2.5
つかみ直し	12	1	12.0	0.9
後処理	53	6	8.8	3.8
小計	9:12			39.43
[灌木処理 39 本]				
ヘッド当て	4:08	27	9.2	6.4
鋸断	2:19	39	3.6	3.6
後処理	3:23	17	11.9	5.2
灌木引き抜き	12:12	41	17.9	18.8
小計	22:02			33.90
[共通 カラマツ・広葉樹 153 本]				
玉材整理	4:07	13	19.0	1.6
障害物処理	10:14	32	19.2	4.0
作業範囲内小移動	15:26	58	16.0	6.1
小計	29:47			11.68
[その他 カラマツ・広葉樹 153 本]				
作業範囲間・作業道移動	25:03	60	25.1	9.8
林道での車通過待ち時間	2:57	5	35.4	1.2
故障による打ち合わせ	19:02	1	1142.0	7.5
作業終了による土場内走行	7:03	1	423.0	2.8
保守管理	2:12	1	132.0	0.9
休息	5:29	1	329.0	2.2
昼食	1:07:45	1	4065.0	26.6
小計	2:09:31			50.79
計	5:49:21			137.0

る。作業範囲が伐採列の左右に変わる場合には、運転席とアームの旋回により、2) の移動が生じないこともある。

これらの移動距離と移動時間の分布は図-1 のようになる。1) の小移動の時間は、移動距離に比例するというよりも、作業に付随した平均値とした方が捉えやすく、表-2 から作業範囲 1 箇所当たり 18.2 秒、伐倒木 1 本当たり 6.1 秒と計算される。作業範囲 1 箇所当たりの小移動距離合計は

平均2.34 mであり、59% が1 m以下であった。2) の作業範囲間の移動距離は10 m以上の場合もあったが、68% を占める6 m以下の場合の平均値は3.53 mであった。

2. 作業能率

ハーベスタによる列状・定性併用間伐では、伐採幅を苗間（立木密度）に対する機械の車幅から、列縁木に傷がつかないように定める。伐採列の間隔は、アームのリーチ、残存立木密度から決まるが、材価が安かったり、整理伐も含むような場合には、定性間伐の能率を上げるために伐採列の間隔をつめることもある。広葉樹の侵入度合いによって作業能率も異なってくるが、広葉樹の侵入度合いも考慮しながらハーベスタの作業能率を以下のようにして理論的に導くことができる。

ベースマシンを地表に静止させたときのアームの作業範囲（水平面上の投影面積）は、機体上方の斜面では傾斜によらずほぼ一定であるが、機体下方の斜面では、傾斜が急になるほど狭くなる(8)。したがって、作業範囲が進行方向の上方および側方となるように等高線に直角方向に上りながら作業するのが効率的であり、機体の安定も良い。そこで、ハーベスタの林内での作業は斜面方向に上下に移動して行うものとする。

斜面長  $Y$  (m) の林地で1 haの作業面積について考える。ハーベスタの全移動距離は次の2通りが考えられる。

1) 同じ伐採列を戻す場合（図-2）

伐区の奥に伐採列間の連絡路がなく、林地が軟弱であったり、斜面が急なためにハーベスタの車体が旋回できない場合、ハーベスタは伐採してきた列を一度戻ってから隣の列に移ることになる。今回の現場がこれに相当する。伐採列の移動は伐区下方の作業道を利用して行うので、ベースマシンの旋回によって林内路面を傷めることはない。ハーベスタの作業範囲の幅を  $R$  (m) とし、伐採列間の半分とする。伐採列内の左右の作業範囲の変更は、運転席の旋回も利用して行われる。

このとき、1 ha 当たりの全移動距離 (m) は、

$$Y \cdot 2 \cdot 10000 / (Y \cdot 2R) + 10000 / Y = 10000 / R + 10000 / Y$$

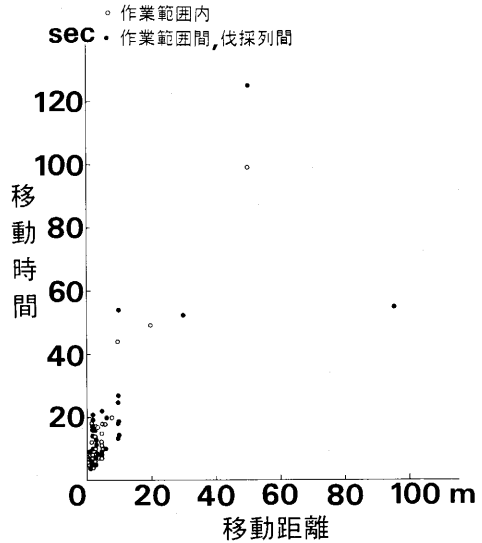


図-1 ハーベスタの移動時間。

Fig. 1. Moving time of a harvester.

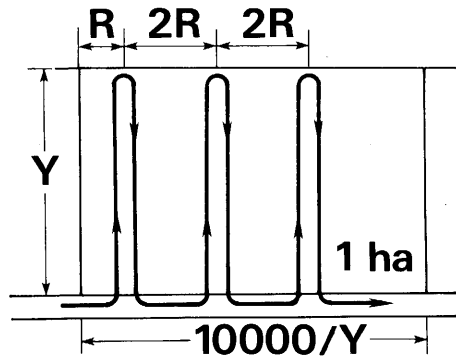


図-2 ハーベスタの作業モデル（同じ伐採列を戻す場合）。

Fig. 2. A model of harvester's operation in case of returning the last felled line.

となる。10000/R は伐採列上の移動距離、10000/Y は作業道上の移動距離である。

ハーベスタの林内平均移動速度を、林地傾斜  $\theta$  (度) の関数として  $v(\theta)$  (m/秒) とすると、1 ha 当たりの移動時間合計  $T_M$  (秒/ha) は、

$$T_M = 10000 / (R \cdot v(\theta)) + 10000 / (Y \cdot v_0) \quad (1)$$

となる。ただし、 $v_0$  は作業道上の移動速度 (m/秒)。

2) 伐区の奥で隣の伐採列に移る場合 (図-3)

伐区の奥に伐採列間の連絡路があり、戻らずに隣の伐採列に移れる場合、1 ha 当たりの全移動距離は  $5000/R + 10000/Y$  となり、

$$T_M = 5000 / (R \cdot v(\theta)) + 10000 / (Y \cdot v_0) \quad (2)$$

となる。

一方、ハーベスタの伐木造材の要素作業は、表-2 に準じて表わせば、{ヘッド当て (位置決めも含む) + 鋸断 + 倒し + 枝払い + 玉切り + つかみ直し + 後処理 + メジャー計測 (材が太い場合)}, {玉材整理 + 障害物処理 + 作業範囲内小移動} となる。第1項の { } 内は針葉樹と広葉樹で異なり、第2項の { } 内は針葉樹と広葉樹で共通である。第1項の針葉樹と広葉樹の立木1本当たりの時間をそれぞれ  $t_N$ ,  $t_L$  (本/秒) とし、第2項の立木1本当たりの時間を  $t_{NL}$  (本/秒) とする。灌木処理の要素作業は、{ヘッド当て + 鋸断 + 後処理 + 引き抜き} となり、灌木1本当たりの処理時間を  $t_B$  とする。その他の打ち合わせ、保守点検、休憩等については、伐木造材の実働時間から除外して扱うことにする。

針葉樹を主林木とし、1 ha 当たり針葉樹の伐倒本数を  $n$  本とし、針葉樹伐倒本数に対する広葉樹と灌木の伐倒本数割合をそれぞれ  $p$ ,  $q$  とする。このとき1 ha 当たり伐木造材時間  $T$  (秒/ha) は、

$$T = t_N \cdot n + t_L \cdot pn + t_B \cdot qn + t_{NL} \cdot (1+p)n \quad (3)$$

となる。したがって、1 ha 当たり出材量を  $V_h$  ( $m^3/ha$ )、1日の実働時間を  $D_0$  (時/日) とすると、生産性  $E_H$  ( $m^3/日$ ) は、

$$E_H = 3600 \cdot c_H \cdot D_0 \cdot V_h / (c_s \cdot T + T_M) \quad (4)$$

となる。ここで、1現場の長期間の作業では上記理論どおりに1分の無駄もなく作業を遂行することは困難であることから、上式に修正係数  $c_H$  を考慮するものとする。また、傾斜地や走行困難地に対しては、今回の作業観測により、ハーベスタの足場を安定させたり、ヘッドを近づけたりするのに時間を要したことから、 $T$  に対する修正係数  $c_s$  を考慮するものとする。 $c_s$  は平坦地で走行条件が良いときを1とする。

表-2の結果に基づき、(4)式を用いて  $E_H$  を計算してみる。今回の作業方法に準じて、20 m 間隔で伐採幅5 mの列状・定性併用間伐とし、 $R=10$  m とする。2 m 間隔で植栽されている場合、2列伐採となる。このときの主林木の伐採率は、理論的には5/20より25%となる。

$$t_N = 68.55, \quad t_L = 39.43, \quad t_B = 33.90, \quad t_{NL} = 11.68 \text{ より,}$$

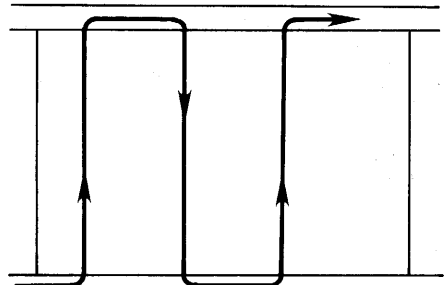


図-3 ハーベスタの作業モデル (伐区の奥で隣の伐採列に移る場合)。

Fig. 3. Another model of harvester's operation.



$$T = (80.23 + 51.11p + 33.90q)n \tag{5}$$

となる。当現場では  $p=0.1, q=0.28$  とする。

図-1 から、作業範囲間の移動および伐採列間の移動速度を  $0.375 \text{ m/秒}$  とし、 $v(0)=v_0=0.375 \text{ m/秒}$  とする。したがって、 $Y$  を  $50, 100, 120, 200 \text{ m}$  とすると、(1) 式から  $T_M$  はそれぞれ  $3200, 2933, 2900, 2800 \text{ 秒}$  となるが、後記するように  $T$  に比べて  $E_H$  に対する  $T_M$  の影響は小さい。当現場の  $Y$  は  $120 \text{ m}$  であった。

$n, V_h$  は収穫予想表から求め、立木  $\text{m}^3$  廻りに対してカラマツの  $E_H$  の計算結果は図-4 のようになる。ハーベスタの実働時間は、調査期間の日報によれば  $6.53 \text{ 時/日}$  であったが、点検や保守管理を除くと、ハーベスタの稼働は  $6 \text{ 時間程度}$  と推測される。厳密には他年度の作業もそれぞれの要素作業と作業条件に基づいて計算しなければならないが、修正係数  $c_H$  を大体  $0.5$  とすることにより、今までの作業結果に対して理論式の適合が良いことが確認される。傾斜試験地の日報のデータを実働  $6 \text{ 時間}$  に換算した生産性は、列間の定性間伐を行っていないので、高くなっている。

$E_H$  に対する  $T_M$  の影響は小さく、伐区の奥で隣の伐採列に移る作業を行う場合でも、伐採列を戻す作業に対して  $E_H$  の増加は  $6\sim 10\%$  である。この場合、林地傾斜が急になれば、下り作業の作業範囲が狭くなるので、 $E_H$  の増加はさらに低くなるものと予想される。 $E_H$  は立木  $\text{m}^3$  廻りの増加によって大きく向上し、単木材積の影響が大きい。これは  $t_N$  や  $t_L$  といった立木  $1 \text{ 本}$  当たりの処理時間が材の大きさによらず一定であるため、処理可能な直径限界のときが最も有利となる

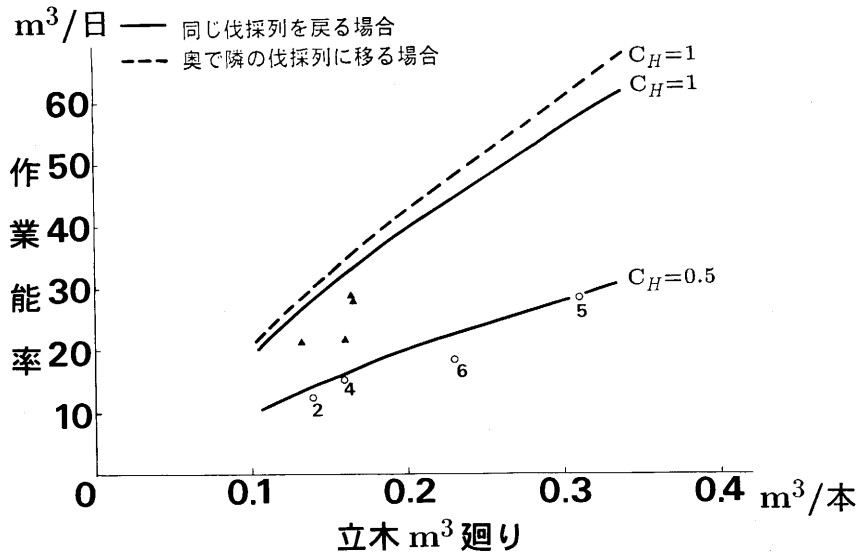


図-4 ハーベスタの作業能率 (カラマツ)。

Fig. 4. Operational efficiency of the harvester (Larch).

注) 図中の数字は実行年度 (平均値)。

▲は平成6年度傾斜試験地の日報の資料。

Notes: Numbers indicate the fiscal years of Heisei (average values).

▲'s indicate daily reports on a test site of steep slopes in the 1994 fiscal year.

ためである(8)。若い林分では $E_H$ は低い、条件を変えて計算した経験から、因子の変化に対する $E_H$ の変動は小さく、立木 $m^3$ 廻りが大きくなるにつれて $E_H$ の変動は大きくなる。したがって、高い収益が期待される立木 $m^3$ 廻りが大きい林分では、熟練したオペレータを配し、 $E_H$ の算定を精密に行う必要がある。 $E_H$ は $t_N$ や $t_L$ によって大きく左右されるので、オペレータの熟練度がいかに重要であるかが確認される。(4)式の適合性の高さは、オペレータの技量が安定して高いことによる点も大きい。

なお、平成5年度作業では、ハーベスタのアームのリーチが9.65mあるので、伐採間隔をもう少し広げることができることが示唆された(6)。このときの現場のように、蓄積が高く、立木間隔が広ければ、伐採間隔を広くとることも可能であるが、平成6年度現場のように若齢林分では、列間の奥の木を伐るのにハーベスタを林内に侵入させなければならないことがあり、林内の小移動時間が増加した。今回の作業条件で、残存幅を18mにして $R=9m$ とし(伐採率は27.8%となる)、林内での小移動時間を仮に半分の3秒とすると、(4)式より $c_H=1$ のときの生産性は $1.5 m^3/日$ 向上することが予想される。

(4)式は機械が変われば、要素作業や走行速度も変わり、小形化等により伐採幅が変われば、伐採率、すなわち $n$ も変わるので、その都度計算をしなければならない。しかし、要素作業時間を観測することにより修正は容易であるので、短期間の調査で十分に対応することが可能である。修正係数 $c_H$ も現場や事業体によって異なるものと考えられるので、今後、多くの現場で資料を収集していく必要があるが、オペレータの技量等に対して各因子の値を修正することにより、相応の結果が得られるものと思われる。

#### 4. フォワーダの作業能率

##### 1. 平成6年度作業の時間観測結果

フォワーダの要素作業の時間観測結果は表-3のようになった。観測時間は5時間40分0秒で、9サイクルであった。

走行時から積込み・荷下ろし時になるときに前方を向いている座席を後方に回転させたり、逆に走行を開始するとき座席を戻す必要があった。この座席回転時間は、積込み・荷下ろし作業の13%を占めていた。前年度調査でも指摘されたが(6)、座席が後方を向いたままで後進していくことが可能になれば、この時間は節減することができる。

積込みとそのため林内移動は、積載量を満たすまで繰り返し行われる。積込みながらの移動は走行距離が短いため、発進、停止の加速の影響が現われ、平均速度はおそくなる。走行距離 $x$ (m)と走行時間 $y$ (秒)についての観測結果は図-5のようになる。発進、停止の加速度を $a$ ( $m/秒^2$ )とすると、一般に

$$x=ay^2 \quad (6)$$

が成り立つので、 $y$ は次式に回帰することができる。

$$y=7.278\sqrt{x} \quad (7)$$

しかし、積込みのための林内移動距離は、製品の種類や分布状況によって異なり、上式をその都度適用するよりも、 $y$ は1サイクル当たりの平均値を用いる方が実用的である。

一方、作業道上の空車走行と実車での帰途の走行は、ある程度の距離を走行するので、距離 $x$ と走行時間 $y$ の関係は直線となる(図-5)。フォワーダの馬力が大きく、整備された平坦な路面で

表-3 フォワーダの要素作業時間  
Table 3. Forwarder average element working times

要素作業	観測時間 時 分 秒	サンプル数 回	1回当たり 秒	サイクル当たり 秒
[積込み・荷下ろし 9サイクル]				
座席回転	24:56	282	5.3	166.2
材をつかむ	53:47	208	15.5	358.6
積込み	51:50	191	16.2	345.6
荷台の材をつかむ	17:14	84	12.3	114.9
荷台の整理	8:59	37	14.6	59.9
林床整理	1:25	5	17.0	9.4
引寄せ	1:56	11	10.5	12.9
積込みのための林内走行	32:17	115	16.8	215.2
土場内移動	1:33	5	18.6	10.3
後進移動(林内)	2:17	7	19.6	15.2
後進移動(土場)	4:57	12	24.8	33.0
荷下ろし	20:45	85	14.6	138.3
つかみ直し(林内)	47	3	15.7	5.2
つかみ直し(土場)	1:29	4	22.3	9.9
ブーム格納(林内)	3:49	32	7.2	25.4
ブーム格納(土場)	1:40	10	10.0	11.1
棚積み整理	2:35	9	17.2	17.2
小計	3:52:16			1548.4
[走行 9サイクル]				
空車	8:19	11	45.4	55.4
実車帰途	15:04	13	69.5	100.4
小計	23:23			155.8
[その他 9サイクル]				
終業	1:34	1	94.0	10.4
その他(失敗等)	9:22		—	62.4
修理	36:40	1	2200.0	244.4
昼食	36:45	1	2205.0	245.0
小計	1:24:21			562.3
計	5:40:00			2226.6

あったので、空車走行と実車走行の極端なちがいは認められず、次の同じ式に回帰することができる。

$$y = 0.866x \quad (8)$$

係数の逆数 1.15m/秒が平均走行速度となる。ただし、ある一定の直線区間の通過時間から測定した走行速度は表-4 のようになり、路面が良好な平坦路では、空車時 10~11 km/時、1/2 積載時 9.6 km/時、1/3 積載時 8.5 km/時であった。長距離の運材では、勾配や積載量、路面の影響も考慮する必要がある。

フォワーダの向きを変えるために、林内および土場で後進の移動が行われ、土場では次式に回帰することができる(図-5)。土場での後進移動は、土場の広さや棚積みの配置によって異なってくるが、距離が限られているので、1サイクル当たりについて一定とみなすことができる。

$$y = 1.457x \quad (9)$$

1回当たりの積込み時間は積込み本数によって違いはないが(表-5)、材長 3.3m 一般材の 1本

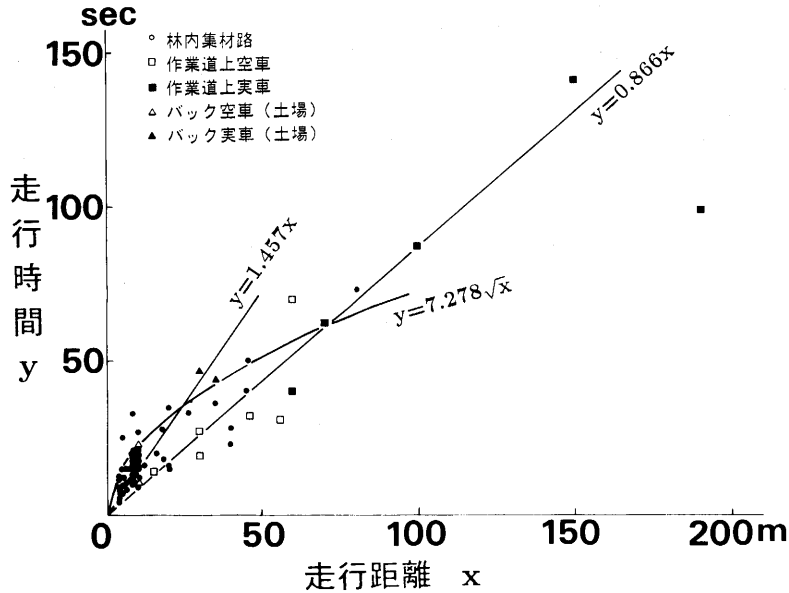


図-5 フォワーダの走行距離  $x$  (m) と走行時間  $y$  (秒) の関係。

Fig. 5. Relationships between moving distance,  $x$  (m), and time,  $y$  (sec), of a forwarder.

表-4 フォワーダの良好路面走行速度 (区間測定)

Table 4. Speed of forwarder on good surfaces

走行路	区間長	積載量	時間	時速
作業道 (路面良)	39.1 m	空車	12.80 秒	11.0 km/時
			13.09	10.8
			13.90	10.1
舗装路面	27.0 m	1/2 積載	14.69	9.6
		2/3 積載	16.35	8.6
		空車	8.69	11.2
	24.5 m	1/2 積載	8.50	11.4
			10.26	9.5
			10.29	9.5
		2/3 積載	10.54	8.4

当たり材積は平均  $0.0896 \text{ m}^3/\text{本}$  で (表-6),  $2.2 \text{ m}$  パルプ材の  $2.9$  倍であるので,  $1$  回当たりの積込み本数は, 例えば  $3.3 \text{ m}$  一般材では平均  $1.9$  本/回,  $2.2 \text{ m}$  パルプ材は  $5.0$  本/回と製品によって異なる (表-7)。積載量は  $3.3 \text{ m}$  一般材のときは  $30$  本前後, パルプ材では  $80\sim 90$  本であり, 積載量を満たすための積込み回数は,  $3.3 \text{ m}$  一般材では  $15\sim 18$  回であるが, パルプ材では例えば  $28$  回と多くなる (表-7)。したがって, 一般的にパルプ材の方が積込みは不利となるが, 製品を組合わせて積込む場合もあり, 今回, 全体の積載量についてみれば正味積込み時間は積載材積に比例しているものとみなすことができる (図-6)。観測した平均積載量は  $2.82 \text{ m}^3$  であった。

$1$  回当たりの荷下ろし時間も荷下ろし本数によらない (表-8)。 $1$  回当たり荷下ろし本数は一般

表-5 フォワーダの製品による積込み時間のちがひ  
Table 5. Forwarder's loading time of each product

1 回当たり積込み本数	1 本	2 本	3 本	4 本	5 本	6 本	7 本	8 本	9 本	10 本以上
[3.3m 材]										
度数 (回)	19	13	13	2						
平均積込み時間 (秒)	14.4	13.7	20.2	12.0						
[2.2m 材]										
度数 (回)	18	15	6	1	1					
平均積込み時間 (秒)	13.6	17.0	15.3	20.0	15.0					
[2m 材 パルプも混入]										
度数 (回)	11	12	3	5		2	1	2		
平均積込み時間 (秒)	15.1	14.2	14.0	17.0		21.5	15.0	15.0		
[2.2m パルプ材]										
度数 (回)	7	6	6	7	9	3	3	2	2	7
平均積込み時間 (秒)	14.4	18.5	15.8	19.6	18.2	19.0	14.0	22.0	14.5	19.1
[シラカバ]										
度数 (回)	3	6	1	3		1	1	1		
平均積込み時間 (秒)	16.7	20.0	16.0	15.0		25.0	13.0	18.0		

表-6 製品の平均材積  
Table 6. Average merchantable volume

製品	材積	サンプル数
3.3m 一般材	0.0896 m <sup>3</sup> / 本	107 本
2.2m 一般材	0.0813	61
2.2m パルプ材	0.0307	58
2m 一般材	0.0336	123

材が 4.1 本 / 回、パルプ材が 8.4~8.7 本 / 回と、パルプ材の方が多いが (表-9)、荷下ろし回数は、3.3m 一般材主体の荷では 6~8 回、パルプ材主体の荷では 11 回と、一般材の方が少ない。したがって、積載量が多くても一般材が主体であれば、荷下ろし時間は短くなる。実際の正味荷下ろし時間は 100~200 秒の間にある (図-6)。今後、フォワーダのグラップルヘッドを大きくすることにより 1 回当たり荷下ろし本数を多くし、荷下ろし回数を削減することが可能である。

## 2. 作業能率

フォワーダは、ハーベスタのように林内を伐り進んでいくのではなく、何度も林内と土場を往復するので、サイクルタイムに基づいて作業能率を理論的に導くことができる。フォワーダ集材も等高線に直角方向が望ましく、等高線沿ではハンドルがきれなかったり、地面を削って根を損傷したりするので、ブルドーザで地面をならしたり、幅員を広くとらなければならない (6)。したがって、傾斜地においてもハーベスタの走行跡を利用するものとする。フォワーダは、機械の負担および燃料消費を考えれば、実車走行は下り方向がよいが、上り方向でも集材を行うものとし、伐採列上では左右から集材し、同一経路の走行を極力少なくするものとする。林内には方向転換のための切り返し場所や伐採列間の連絡路を確保することができれば望ましい。

平均集材距離を  $L$  (m) とし、伐区が土場から離れている場合には、 $L$  とは別に作業道上の走行

表-7 フォワーダの積載本数（積込み回数）と正味積込み時間

Table 7. Payload, number of loading operations, and net loading time (excluding moving) of the forwarder

運行 No.	3.3 m 材 本 (回)	2.2 m 材 本 (回)	2.2 m パルプ材 本 (回)	2 m 材 本 (回)	シラカバ 本 (回)	計 (不明) 本 (回)	正味 積込み時間 秒	積載量 m <sup>3</sup>
1	28 (15)					28 (2) (15)	218	2.50
2	1 (1)	12 (9)	7 (2)			20 (2) (12)	163	1.28
3			72 (8)	26 (17)		98 (4) (25)	399	3.08
4		28 (15)	52 (12)			80 (7) (27)	434	3.87
5	30 (13)					30 (0) (13)	207	2.69
6			55 (12)		42 (16)	97 (5) (28)	557	—
7		33 (18)		43 (16)		76 (3) (34)	556	4.13
8	31 (18)					31 (0) (18)	298	2.78
9			66 (16)	6 (3)		72 (4) (19)	278	2.23
計	90 (47)	73 (42)	252 (50)	75 (36)	42 (16)	533 (191)	3097	平均 2.82
本 / 回	1.9	1.7	5.0	2.1	2.6	2.8		

注) 積載本数は荷下ろし土場での観測本数。  
(不明) は、積込み時に観測された本数に対して不足の本数。

距離  $L_0$  (m) を考慮するものとする。このとき、平均サイクルタイム  $C_y$  (秒 / 回) は

$$C_y = T_L + L (1/v_{F1} + 1/v_{F2}) + L_0 (1/v_1 + 1/v_2) \quad (10)$$

ただし、

$T_L$ : 積込み・荷下ろし時間合計。林内での積込みのための移動時間も含む。

$v_{F1}$ : 林内での空車速度 (m / 秒)

$v_{F2}$ : 同上実車速度 (m / 秒)

$v_1$ : 伐区が土場から離れている場合の作業道上の空車速度 (m / 秒)

$v_2$ : 同上実車速度 (m / 秒)

となる。1 回当たり積載量を  $V_F$  (m<sup>3</sup> / 回) とすると、生産性  $E_F$  (m<sup>3</sup> / 日) は、

$$E_F = 3600 \cdot c_F \cdot D_0 \cdot V_F / C_y \quad (11)$$

となる。ただし、 $c_F$  は全体の修正係数。なお、傾斜地に対しては、走行速度で修正を行うものとする。

$v_{F1} = v_{F2} = 1.15$  m / 秒,  $L_0 = 0$ ,  $V_F = 2.82$  m<sup>3</sup> とし、表-3 の数値を用いて当現場の  $E_F$  を計算すると、

$$E_F = 65520 \cdot c_F / (1548 + 1.74L) \quad (12)$$

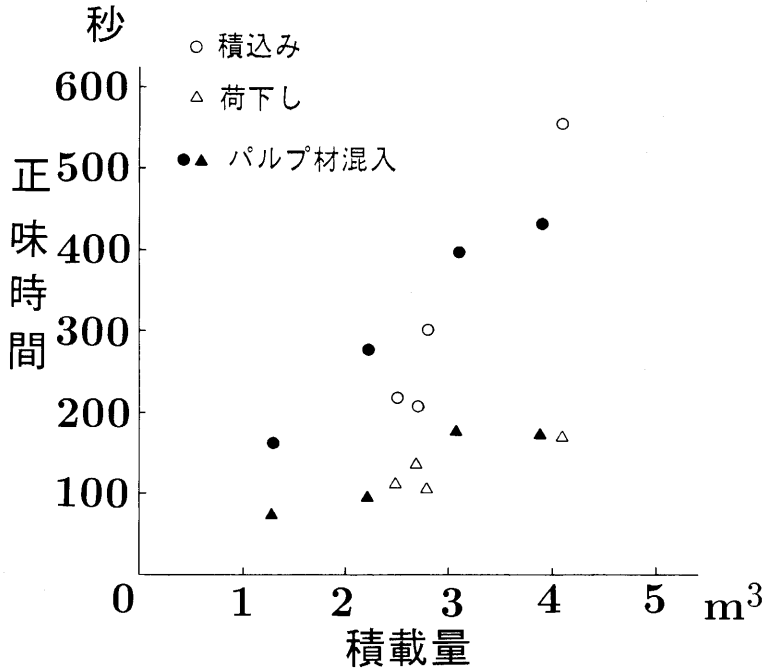


図-6 フォワーダの積載量と正味積込み・荷下し時間の関係。

Fig. 6. Relationships between payload and net loading and unloading time of a forwarder.

となる(図-7)。フォワーダの実働時間は、調査期間の日報によれば6.94時/日であったが、点検や保守管理を除き、 $D_0=6.5$ 時間とした。平成6年度の作業実績に対する修正係数 $c_F$ は、図-7より約1.1となったが、ハーベスタとの組み合わせ作業では、一般的にフォワーダの方に余裕があるため、ハーベスタの作業状況にあわせてフォワーダの生産性が変動することもありうる。したがって、(11)式はフォワーダ作業の最大値と見ることができる。過去の実績を見てみると、現場によって製品の種類や林内の玉材の集積・整理状況も異なるので、ばらついているが、平成6年度作業の日報のデータを実働6.5時間に換算してプロットしてみると(図-8)、換算の影響もあってばらついてはいるが、(11)式の傾向を表しているといえる。傾斜試験地では生産性が低くなっているが、グラップルソーで平坦な沢縁まで集積した材を集材したので、勾配による直接の影響は少ないものと思われる。

(11)式の $L$ の係数が小さいこと、および図-7,8から、フォワーダの作業能率にとって、走行速度や集材距離よりも、積込み・荷下し時間を短縮することが重要であることがわかる。同じ製品が林地にまとまってあれば一度に積み込むことができるが、製品の種類が多く、量が少なきには、フォワーダの移動と積込みに要する手間が多くなる。オペレータの技量も重要ではあるが、座席の回転、グラップルの容量等の改善事項が残されている。なお、積載量を増やせば(11)式の分子が大きくなり、走行回数も少なくなるが、ホイール式では接地圧が高くなるので、林地への対策についても考慮する必要が生じてくる。小形車両では消耗品費や修理費がかさむことが予想される。フォワーダの大きさ、積載量は、今後検討を要する課題である。

表-8 フォワーダの製品による荷下ろし時間のちが

Table 8. Forwarder's unloading time of each product

1 回当たり荷下ろし本数	1 本	2 本	3 本	4 本	5 本	6 本	7 本	8 本	9 本	10 本以上
[3.3m 材]										
度数 (回)	1	1	5	8	3	3	1			
平均荷下ろし時間 (秒)	13.0	10.0	13.2	18.6	21.0	13.0	21.0			
[2.2m 材]										
度数 (回)		3	3	5	4	3				
平均荷下ろし時間 (秒)		10.0	13.7	15.4	11.5	13.3				
[2m 材 パルプ材も混入]										
度数 (回)				1	1	1	0	4	2	1
平均荷下ろし時間 (秒)				15.0	18.0	13.0		15.5	20.0	15.0
[2.2m パルプ材]										
度数 (回)	27	6				2	7	1	4	13
平均荷下ろし時間 (秒)	10.5	18.5				9.5	10.6	11.0	18.5	16.2
[シラカバ]										
度数 (回)		1				1		1		2
平均荷下ろし時間 (秒)		20.0				11.0		11.0		12.0

表-9 フォワーダの積載本数 (荷下ろし回数) と正味荷下ろし時間

Table 9. Payload, number of unloading operations, and net unloading time (excluding moving) of the forwarder

運行 No.	3.3m 材 本 (回)	2.2m 材 本 (回)	2.2m パルプ材 本 (回)	2m 材 本 (回)	シラカバ 本 (回)	計 (不明) 本 (回)	正味 荷下ろし時間 秒	積載量 m <sup>3</sup>
1	28 (6)					28 (2) (6)	111	2.50
2	1 (1)	12 (3)	7 (1)			20 (2) (5)	74	1.28
3			72 (7)	26 (4)		98 (4) (11)	177	3.08
4		28 (7)	52 (6)			80 (7) (13)	173	3.87
5	30 (7)					30 (0) (7)	133	2.69
6			55 (6)		42 (5)	97 (5) (11)	176	—
7		33 (8)		43 (5)		76 (3) (13)	170	4.13
8	31 (8)					31 (0) (8)	104	2.78
9			66 (9)	6 (1)		72 (4) (10)	95	2.23
計	90 (22)	73 (18)	252 (29)	75 (10)	42 (5)	533 (84)	1213	平均 2.82
本 / 回	4.1	4.1	8.7	7.5	8.4	6.3		

注) 積載本数は荷下ろし土場での観測本数。

(不明) は、積込み時に観測された本数に対して不足の本数。



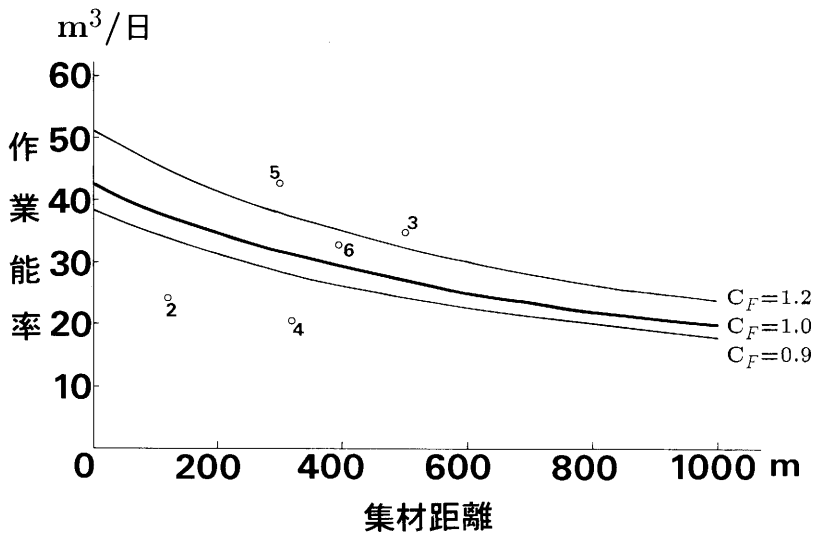


図-7 フォワーダの作業能率.

Fig. 7. Operational efficiency of the forwarder.

注) 図中の数字は実行年度 (平均値).

Note: Numbers indicate the fiscal years of Heisei (average values).

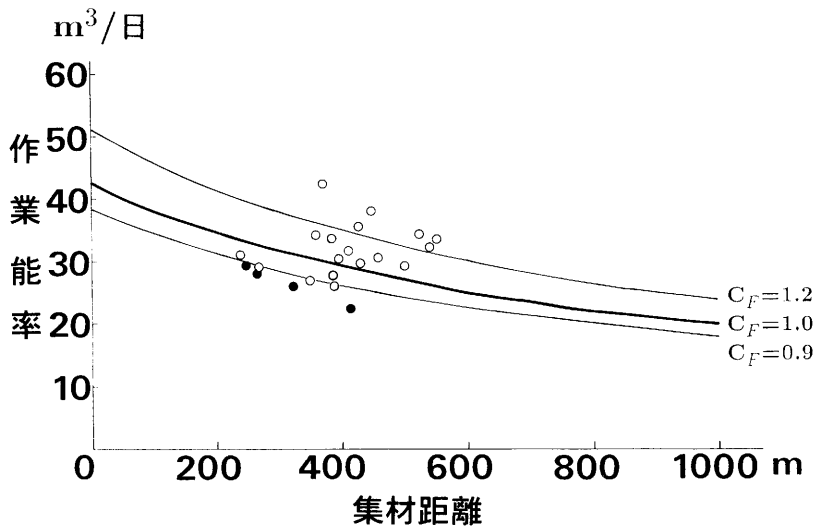


図-8 フォワーダ日報の作業能率.

Fig. 8. Operational efficiency of daily reports of the forwarder.

注) ●は傾斜試験地.

Note: ●'s indicate daily reports on a test site of steep slopes.

## 5. お わ り に

高能率林業機械を導入する場合、森林施業の体系と連携を図りながら、機械の性能を引き出していく必要がある。材価が安いカラマツであったり、整理伐も含むような場合には、例えば前回の1伐7残の残存木の中央を伐採列とする1伐3残にして間を定性間伐にするなど、計画的な伐採方法の確立が望まれる(5)。伐採後の植林も使用機械を前提に検討しなければならない。ハーベスタ、フォワーダの組み合わせについても、いろいろな局面で応用していく工夫が必要である。例えば、広葉樹パルプ材や針広混交林ではハーベスタ伐倒、グラップルソー造材という方法も考えられる。

今回の作業能率の理論式の適合はまずまずであるが、精度を高め、一般的なものとするには、今後調査事例を増やし、さらに樹種ごとにデータを収集していく必要がある。勾配に対するハーベスタやフォワーダの移動速度についても、さらに詳しい実験的検討が必要である。また、ハーベスタの枝払い時間は樹高によらず一定とみなしているが、材の大きさによって数値を見直す必要がある。

機械走行による林地への影響を調べるために、平成4年度の現場について轍掘れの深さや土壌支持力、植生回復について、経年観察を行っている。1年後の回復については一部報告されているが(3)、詳細については別の機会に報告する。

## 要 旨

ハーベスタ、フォワーダによる列状・定性間伐作業の作業能率を時間分析結果から検討した。ハーベスタの作業能率の理論式は、修正係数を用いることにより、今までの作業結果に対して適合が良いことが確認された。ハーベスタの作業能率は立木  $m^3$  廻りの増加によって大きく向上し、移動時間の影響は小さい。高い収益が期待される立木  $m^3$  廻りが大きい林分では、因子の変化に対する作業能率の変動も大きいので、作業能率を予測する場合には算定を精密に行う必要がある。フォワーダについては平均サイクルタイムから作業能率の理論式を求めた。フォワーダの作業能率にとって、走行速度や集材距離よりも、積込み・荷下ろし時間の影響が大きい。正味積込み時間は積載材積に比例している。積載量を増やせば走行回数は少なくなるが、ホイール式では接地圧が高くなるので、林地への対策についても考慮する必要が生じてくる。

**キーワード:** ハーベスタ、フォワーダ、間伐作業、作業能率

## 引 用 文 献

- (1) 有賀一広・岩岡正博・酒井秀夫・小林洋司(1995) 半脚式歩行機械による間伐作業. 森林研誌, 10, 105-115.
- (2) 小林洋司・岩岡正博・仁多見俊夫(1993) ハーベスタとフォワーダによる間伐材搬出作業システム. 東大演報, 89, 81-97.
- (3) 熊倉由典・田坂聡明・酒井秀夫(1994) 林業用大型機械作業による林地土壌締固めへの影響. 森林研誌, 9(2), 41-51.
- (4) 林野庁(1992) 平成3年度高性能林業機械による新たな作業システムの確立に関する調査. 140 p.
- (5) 林野庁(1993) 平成4年度高性能林業機械による新たな作業システムの確立に関する調査—林地及び残存立木への影響等について—. 112 p.

- (6) 林野庁 (1994) 平成 5 年度高性能林業機械による作業システムの定着・実用化に関する調査. 143 p.
- (7) 林野庁 (1995) 平成 6 年度高性能林業機械による作業システムの定着・実用化に関する調査. 105 p.
- (8) 酒井秀夫・赤羽根康弘・村山茂明 (1989) 五脚歩行機械の伐木作業. 宇大演報, 25, 15-22.  
(1995 年 4 月 26 日受付)  
(1995 年 11 月 6 日受理)

### Summary

Operational efficiency of both line and qualitative thinning by a combination of harvester and forwarder was investigated using a time study. The theoretical operational efficiency of the harvester fitted well to past operations when multiplied by a correction coefficient. The productivity tended to be higher as stem volume increased. In the case of large stem volumes, it was so variable that precise values must be used to predict operational efficiency. The operational efficiency of the forwarder was derived via its cycle time. It was more affected by loading and unloading time than moving speed and hauling distance. Net loading time was proportional to the payload. When increasing the payload capability, the number of cycles would be decreased. However ground pressure would also be increased, so a way to protect the forest site must also be considered.

**Key words:** Harvester, Forwarder, Thinning, Operational efficiency

## Genetic Structure of a *Picea polita* Population in a *Pinus densiflora* Forest

Yuji IDE

The vegetation was surveyed in a natural forest of *Picea polita* and in its neighboring secondary forest of *Pinus densiflora* at Yamanakako, Yamanashi, Japan. Regeneration of *P. polita* was observed in the *P. densiflora* forest which was regenerated by forest fire about 100 years ago. However the pure old stand of *P. polita* had declined considerably and no advanced seedlings and saplings of *P. polita* were observed. The genetic structure of *P. polita* in the *P. densiflora* stand was investigated by isozyme analysis. The regenerated trees of *P. polita* in the *P. densiflora* stand had a multistoried composition. However there was no genetic difference among the stories. The *P. polita* individuals growing in the different stories are considered to belong to a population holding a gene pool in common.

## Operational Efficiency of Thinning with a Harvester-Forwarder System

Hideo SAKAI, Masahiro IWAOKA, Sangjun PARK  
and Hiroshi KOBAYASHI

Operational efficiency of both line and qualitative thinning by a combination of harvester and forwarder was investigated. The theoretical operational efficiency of the harvester fitted well to past operations when adjusted by a correction coefficient. The productivity tended to be higher as stem volume increased. Operational efficiency of the forwarder was derived from its cycle time. It was more affected by loading and unloading time than moving speed and hauling distance.