

Title: 異なる2 機種タワーヤードによる集材作業の労働生産性, 費用と最適路網密度

Productivity, operational cost, and optimal forest road density of yarding  
operations with two different tower yarders

Author: 金旼奎・櫻井倫・仁多見俊夫・酒井秀夫

Minkyu KIM, Rin SAKURAI, Toshio NITAMI, Hideo SAKAI

#### Additional information(追加情報) :

この論文は以下のように出版されましたが、その後、以下のように修正した点があります。

東京大学農学部演習林報告 134 号、2016 年 2 月、1-17 頁

#### 書誌情報の修正

修正 1 1 頁 誤 : 東京大学農学部演習林報告, 134, 1-17 (2015)

正 : 東京大学農学部演習林報告, 134, 1-17 (2016)

修正 2 3、5、7、9、11、13、15、17 頁

誤 : Bull. Univ. of Tokyo For, 134, 1-17(2015)

正 : Bull. Univ. of Tokyo For, 134, 1-17(2016)

著者名が英文小文字になっていた箇所をスモールキャピタルに修正

修正 1 1、4、5、12、16 頁

論文

## 異なる 2 機種タワーヤードによる集材作業の 労働生産性、費用と最適路網密度

金 旻奎<sup>\*1</sup>・櫻井 倫<sup>\*2</sup>・仁多見俊夫<sup>\*1</sup>・酒井秀夫<sup>\*1</sup>

## Productivity, operational cost, and optimal forest road density of yarding operations with two different tower yarders

Minkyu KIM<sup>\*1</sup>, Rin SAKURAI<sup>\*2</sup>, Toshio NITAMI<sup>\*1</sup>, Hideo SAKAI<sup>\*1</sup>

### 1. はじめに

タワーヤードは急峻で複雑な地形において集材作業が可能な架線系林業機械であり、間伐作業や、大径材、全木材の搬出にも適用が可能である。日本においては 1980 年代末に欧州製タワーヤードが紹介され、同時に国産機の開発も始まり、1990 年代半ばから集材作業分析に関する研究（酒井, 1997；藤田, 1999）や架線間隔と路網に関する研究（朴ら, 1994；木幡ら, 1999；SRIPARAM, 2001；山口ら, 2004）など、実用化や普及に向けた研究が行われてきた。2000 年代になると、汎用性の高いバックホウをベースマシンとしたスイングヤードが台頭し、タワーヤードの普及台数は頭打ちになっていった。しかし、スイングヤードは、能率的には短距離集材向けであり、地引き集材時は荷掛け手の労働負担も大きいことから、作業能率が維持できる集材距離の延伸化が望まれるようになっていった。2010 年前後より欧州製タワーヤードの再検討（中澤ら, 2012；中澤ら, 2015）が進み、2013 年には国産タワーヤードの新型機種が発売されるなど、タワーヤードの見直しの気運が高まっている。

海外のタワーヤードは最大スパン長 500 m 以上の大型機種もあり、主索固定式（スタンディングスカイライン式）の索張りを行い、索が地表に接触しないように中間支持器を使用して架線の線下高を確保したりするのが主流であるのに対し、国産タワーヤードは最大スパン長 200 ～ 300 m で、中間支持器を使用せず、ランニングスカイライン式による索張りを前提とした機種が主流を占めている。それぞれの機種ごとに開発の特徴があることから、これまでの研究では、導入を図っていくうえで適切な作業仕組みや路網との関係について考究したものが多い（朴ら, 1994；木幡ら, 1999；田坂ら, 2000；朴ら, 2003）。本研究は、2011 年に日本に導入されたオーストリア製のタワーヤード WANDERFALKE U-AM-2to と 2012 年に発売された国産タワーヤード NR301 による集材作業について、労働生産性や費用を分析し、それぞれの集材作業と必要な路網整備について考察を行った。

---

\*1 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 Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

\*2 宮崎大学農学部森林緑地環境科学科

Department of Forest and Environmental Sciences, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki

## 2. 調査地と方法

### 2.1 対象機種と調査地

調査対象とするタワーヤーダは、オーストリア MAYR-MELNHOF FORSTTECHNIK 社製 WANDERFALKE U-AM-2to（以下 WF と略記）と国内 IHI 建機社製 NR301（以下 NR）である。両機種の諸元を表－1 に示す。WF と NR のエンジン出力はそれぞれ 100kW, 89.7kW とほぼ同等であり、いずれも中型機種といえる。

WF はトラクタでけん引して移動するタイプである（図－1）。WF の索張り方式を図－2 に示す。主索固定式（スタンディングスカイライン式）で、搬器には同社製 Shelpa U-3to を搭載し、先山と本体の間を自動走行・停止する機能を有する。中間サポートを使用することで線下高を確保し、複雑な地形への対応を可能にしている（中澤ら, 2012）。一方, NR は 2012 年に発売されたタワーヤーダで, 3 胴ドラムによるランニングスカイライン式を前提としている（図－3）。供試機は作業道走行を前提にクローラ車両をベースマシンとし, 自走可能である。NR の索張り方式を図－4 に示す。

調査は WF については高知県香美市香北町で（以下, 調査地 A）, NR については島根県浜田市金城町で行った（以下, 調査地 B）（表－2）。

調査地 A は 51 年生のヒノキ・スギ人工林であり, 本数伐採率 32.5% の定性間伐が行われた。伐区は林道に接し, 集材距離 51 ～ 100 m, 横取り距離 0 ～ 20 m であった。作業システムは,

表－1 タワーヤーダの諸元  
Table 1. Specifications of the investigated tower yarders

機種名	WANDERFALKE U-AM-2to	NR301
機械質量（ kg ）	10200	10500
全長（ mm ）	6572	6010
全幅（ mm ）	2374	2620
全高（ mm ）	3615	2725
タワー高さ（ m ）	10.57	6.5/8.2
エンジン出力（ kW, ps, rpm ）	100, 136, 2200	89.7, 122, 2200
直引力（ kgf ）	2000	3000
搬器最大走行速度（ m/秒 ）	5.00	2.92
設計最大集材距離（ m ）	500	200



図- 1 タワーヤードWANDERFALKE U-AM-2to

Fig.1. WANDERFALKE U-AM-2to tower yarder



図- 3 タワーヤードNR301

Fig.3. NR301 tower yarder

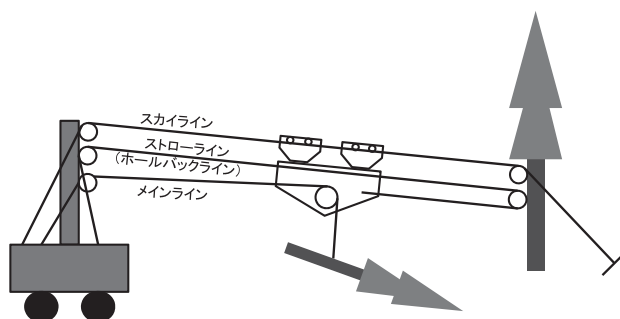


図- 2 WANDERFALKE U-AM-2toの索張り方式 (上げ荷集材)

Fig.2. Cable system (uphill yarding) of WANDERFALKE U-AM-2to  
索の名称はメーカーによる。下げ荷集材の場合はメインラインが先柱側で折り返す。

Each cable is named according to the manufacturer. In the case of downhill yarding, the main line turns back at the tail tree.

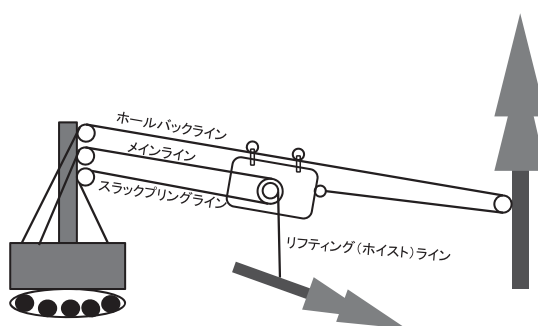


図- 4 NR301 の索張り方式

Fig.4. Cable system of NR301

索の名称はメーカーによる。

Each cable is named according to the manufacturer.

チェーンソーによる先行伐倒後、タワーヤードによる全木材上げ荷集材が行われ、集材された材はプロセッサによって林道沿の土場で造材・整理された。材が貯まらないうちにトラック（グラップルローダ付き）で搬出された。作業システムの人員数はタワーヤードオペレータ 1 人、荷掛け手 2 人であり、タワーヤードオペレータがプロセッサによる造材作業も行う 3 人 1 組であった。

調査地 B は広葉樹を主体とした天然林であり、本数伐採率 95% 以上で皆伐とほぼ変わらない更新伐作業であった。伐区は作業道沿いの土場に接し、集材距離 2 ～ 64 m、横取り距離 0 ～ 42 m であった。作業システムとしてはチェーンソーによる先行伐倒後、タワーヤードによる全木材上げ荷集材作業が行われ、集材された材はグラップルソーによって適宜鋸断され、樹幹部の丸太と枝付きの梢端材に分類して、それぞれ土場に集積された。梢端材は後にチップにされた。作

表-2 調査地の概要  
Table 2. Description of study sites

	調査地A	調査地B
所在	高知県香美市 香北町萩野	島根県浜田市 金城町下来原
伐区面積 ( ha )	0.364	0.408
平均傾斜 ( ° )	線下 : 19.5 横取り方向斜面 : 35	線下 : 21.6 全体 : 14.2
林種	人工林	天然林
樹種	ヒノキ, スギ	広葉樹雑木主体, 一部スギ, 枯損マツ
林齢 (年)	51	不定
平均胸高直径 ( cm )	29.3	22.7
平均樹高 ( m )	16.0	12.8
平均幹材積 ( m <sup>3</sup> /本 )	0.498	0.151
ha当り材積 ( m <sup>3</sup> )	622.5	290.5
ha当り立木本数 (本)	1250	1924
本数伐採率 (%)	32.5	95 以上

業システムの人員数はタワーヤーダオペレータ 1 人, 荷掛け手 2 人であり, グラップルソーの操作はタワーヤーダオペレータが行う場合と専任のオペレータが行う場合があり, 3 ~ 4 人 1 組であった。

観測した作業は対象とした作業機による地元での標準的なもので, 林況条件の差はあるものの入手できるデータに基づいて検討を行った。

## 2.2 調査方法

両調査地において, ストップウォッチを用いて作業時間を測定し, 要素作業ごとに分類して分析を行った。要素作業は荷下ろし場での「フック上げ」, 搬器「空走行」, 荷掛け手の「索をつかむための移動」, 荷掛け手の「索引き出し」, 「荷掛け」, 「退避」, 「索巻上げ」, 搬器「実走行」, 荷を下ろす「荷下ろし」, 搬器からの「荷外し」の 10 種である (朴ら, 1994 ; KIM and PARK, 2012)。集材距離の計測には調査地 A では GPS 受信機 (Cuu:B 社製 PG-S1) を, 調査地 B ではレーザー距離計 (BOSCH 社製 GLM80) を用いた。

### 2.3 分析方法

本調査地のように伐区が道路や土場に接し、集材距離 0 から最大集材距離  $L$  (m) まで均等に集材される場合、集材作業の平均サイクルタイム (秒/回) は次式で表現することができる (酒井, 1987)。ただし、路網とタワーヤードの機動性を生かして樹高以上の長い横取りは行わないものとする。

$$C_y(L) = L(1/v_1 + 1/v_2)/2 + T_{Lv} \quad (1)$$

ただし、 $C_y(L)$ : 最大集材距離  $L$  (m) に対する集材作業の平均サイクルタイム (秒/回),  $L$ : 平均サイクルタイム算出時の最大集材距離 (m/回), 本論では  $L$  の上限を 200m とする。 $v_1$ ,  $v_2$ : 搬器の空走行と実走行の速度 (m/秒),  $T_{Lv}$ : 集材 1 回当りのフック上げ, 索をつかむための移動, 索引き出し, 荷掛け, 退避, 索巻き上げ, 荷下ろし, 荷外しの時間 (秒/回)。

平均サイクルタイムと 1 日当り実働時間を用いて 1 日当りのサイクル数を求め、これに 1 サイクル当り荷掛け材積を乗じて 1 日当り生産性を予測することにする。最大集材距離  $L$  (m) に対して、生産性 ( $\text{m}^3/\text{日}$ )  $P(L)$  は (2) 式のとおりとなる。

$$P(L) = (60 \times 60 \times H / C_y(L)) \cdot V_l \quad (2)$$

ただし、 $V_l$ : 1 サイクル当りの平均荷掛け材積 ( $\text{m}^3/\text{回}$ ),  $H$ : 1 日当り実働時間 (ここでは 6 時間とする)。 $v_2$  は  $V_l$  によらないものとし、既往の研究 (中澤ら, 2012) よりサイクルタイムと荷掛け材積との間に明確な関係がないものとする。

1 時間当たり作業費用 (円/時) は固定費, 変動費, 副作業費, 労務費で構成され、これらの合計を上記の生産性 ( $\text{m}^3/\text{日}$ ) で割ることにより単位生産量当りの単価で表すことができる (全国林業改良普及協会編, 2001)。集材作業費用に関わる数値は既往の研究 (全国林業改良普及協会編, 2001; 岡ら, 2005; KIM and PARK, 2013) に基づいて表-3 に示すとおりとし、最大集材距離に対する作業費用 (円/ $\text{m}^3$ ) を求めた。

固定費は償却費, 管理費, 資本利子で構成され、次式より求められる。

$$\text{償却費 (円/時)} = \frac{\gamma \times I}{X} \quad (3)$$

$$\text{管理費 (円/時)} = \frac{\varepsilon_c \times I}{X_n} \quad (4)$$

$$\text{資本利子 (円/時)} = \frac{(\omega - \frac{1}{n}) \times I}{X_n} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

ただし、 $\gamma$ : 償却費率,  $I$ : 機械価格 (円),  $X$ : 機械耐用時間 (時),  $\varepsilon_c$ : 年間機械管理費率,  $X_n$ : 年間稼動時間 (時/年),  $\omega$ : 資本利子係数,  $n$ : 耐用年数 (年),  $i$ : 年利率。

変動費は保守・修理費, 燃料・油脂費で構成され、次式より求められる。

$$\text{保守・修理費 (円/時)} = \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_B) \times I}{X} \quad (7)$$

$$\text{燃料・油脂費 (円/時)} = Q \times Q_c \times (1+q) \quad (8)$$

表-3 集材作業費用の算出に使用した値  
Table 3. Values used for the calculation of yarding cost

		WF	NR
機械価格 (円)	$I$	33000000	27000000
耐用時間 (時)	$X$	6300	6300
耐用年数 (年)	$n$	7	7
1 日運転時間 (時)	$H$	6	6
年間運転日数 (日/年)	$D$	150	150
年間稼動時間 (時/年)	$Xn$	900	900
償却費率	$\gamma$	0.9	0.9
保守・修理費率	$\varepsilon_A + \varepsilon_B$	0.2	0.2
年間機械管理費率	$\varepsilon_C$	0.07	0.07
調査地における燃料消費量 (L/時)	$Q$	5	5
燃料単価 (円/L)	$Q_C$	86.4	86.4
燃料費に対する潤滑油等の油脂費率	$q$	0.38	0.38
年利率	$i$	0.07	0.07
資本利子係数	$\omega$	0.21	0.21
調査地の平均生産性 ( $\text{m}^3/\text{日}$ )	$P$	29.99	26.18
労務費 (円/人日)		15000	15000
償却費 (円/時)		4714	3857
管理費 (円/時)		2750	2250
資本利子 (円/時)		1694	1386
保守・修理費 (円/時)		1048	857
燃料・油脂費 (円/時)		912	912
労務費 (円/時)		7500	7500

軽油単価はガソリン・灯油価格情報 NAVI (<http://oil-stat.com/light.html>) の全国軽油販売価格 (参照 2015 年 4 月 20 日) から軽油引取税 (地方税法附則第 12 条の 2 の 8) を除いた免税軽油単価とし、労務費は 15000 円/人日と想定する。

ただし、 $\varepsilon_A$ : 現場修理費率,  $\varepsilon_B$ : 定期整備費率,  $Q$ : 燃料消費量 (L/時),  $Q_C$ : 燃料単価 (円/L),  $q$ : 燃料費に対する潤滑油等の油脂費率。

副作業費は架線の架設・撤去費, 路網費で構成される。図-5 のように伐区が道に接しているものとし, 最大集材距離  $L$  (m) に対して, 架線 1 本当りの集材面積を最大集材距離と伐区幅 (ここでは伐採列間の距離とする) に基づいて求め, 出材材積当りの架設・撤去費  $Csd(L)$  (円/ $\text{m}^3$ ) を次式より求めることにする。

$$Csd(L) = ((L \cdot (\frac{1}{v_j} + \frac{1}{v_d}) + Ts) + ((L \cdot (\frac{1}{v_j} + \frac{1}{v_d}) + Td)) \cdot \frac{\frac{Cd}{3600}}{(\frac{Vh \cdot Ls \cdot L}{10000})} \quad (9)$$



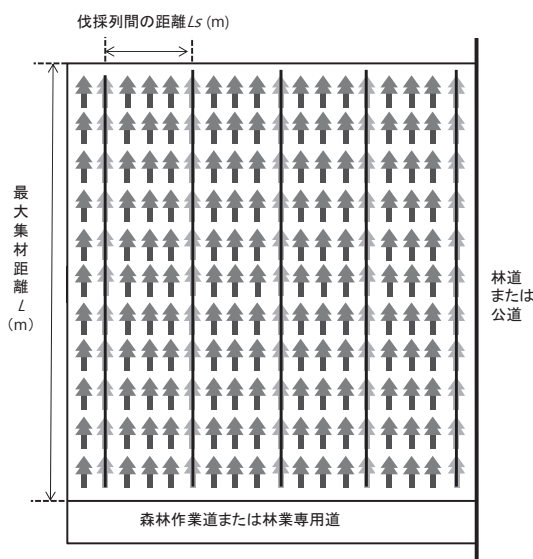


図-5 列状間伐モデル伐区

Fig.5. Strip-thinning setting model

ただし,  $v_3$ ,  $v_4$ : 作業員のタワーヤードから先柱までの行きと帰りの移動歩行速度 (m / 秒),  $T_s$ : 架設時間 (秒 / 回),  $T_d$ : 撤去時間 (秒 / 回),  $C_d$ : 架設・撤去作業の作業員の労務費 (円 / 時),  $V_h$ : ha 当り出材材積 ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ),  $L_s$ : 伐採列間の距離 (m)。架設・撤去作業の作業員の労務費 (円 / 時) は, ここでは作業員 4 人とし, 表-3 の 15000 円 / 人日より  $C_d$  を 10000 円 / 時とする。

本論では作業時間観測に基づいて労働生産性を分析したが, 林分条件は調査地 A に類似した 50 年生スギ人工林を想定して ha 当り材積を  $660 \text{ m}^3/\text{ha}$  とし (時光・川元, 2008), 3 残 1 伐の列状間伐 (伐採率 25 %) を想定することで, WF と NR の作業条件同一の下で両者の比較を行うこととし (図-5),  $V_h$  を  $165 \text{ m}^3/\text{ha}$  ( $660 \text{ m}^3/\text{ha}$  の 25%), ha 当り立木本数を 1281 本 / ha として  $L_s$  を 11 m と設定した。なお, 図-5 において道に対して両側集材を行うものとする。また, 主伐を迎えた小面積皆伐への適用を想定して, 伐区面積を  $L_s \times$  最大集材距離とすれば, (9) 式をそのまま適用することができる。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 労働生産性

調査地 A では, WF による 36 サイクル, 集材本数 30 本, 計  $14.94 \text{ m}^3$  の集材作業を観測した。1 サイクル当りの平均荷掛け材積は  $0.42 \text{ m}^3/\text{回}$ , 平均サイクルタイムは 298.94 秒 / 回であった。調査地 B では, NR による 82 サイクル, 集材本数 251 本, 計  $38.01 \text{ m}^3$  の集材作業を観測した。1 サイクル当りの平均荷掛け材積は  $0.46 \text{ m}^3/\text{回}$ , 平均サイクルタイムは 381.33 秒 / 回であり (表-4), 架設・撤去時間は調査地 A が 18000 秒, 調査地 B が 7534 秒であった (表-5)。

両調査地とも搬器走行速度は, 実車, 空車とも設計された走行速度 (表-1) の半分以下であった。この理由として, 表-1 の走行速度は定常状態の区間速度であり, 実際には搬器が動き

表－4 集材作業の観測結果（1）  
Table 4. Observation results of yarding operation (1)

調査地		A (WF)	B (NR)
測定値	集材回数 (回)	36	82
	集材本数 (本)	30	251
	集材材積 (m <sup>3</sup> )	14.94	38.01
	集材時間 (秒)	10762	31269
	作業員数 (人)	3	3
1 回当りの平均	集材材積 (m <sup>3</sup> /回)	0.42	0.46
	集材時間 (秒/回)	298.94	381.33
1 時間当りの平均	集材回数 (回/時)	12.04	9.44
	集材材積 (m <sup>3</sup> /時)	5.00	4.36
1 日当りの平均	集材回数 (回/日)	72.25	56.64
	集材材積 (m <sup>3</sup> /日)	29.99	26.18
1 人 1 日当りの平均	集材材積 (m <sup>3</sup> /人日)	10.00	8.73

調査地 A の全木集材の場合、タワーヤードによる集材作業中、集材木が他の木などにかかってエンジンに負荷がかかりすぎて集材ができなかったことがあり、チェーンソーを用いて半分にしてから集材を行ったので、その場合は集材本数 0.5 とした。

始めてから停止するまで加減速があり、両調査地とも集材距離が設計最大集材距離の半分以下と短かったことも一因と思われる。

表－5 の観測値を (1) 式に代入すると、WF および NR の平均サイクルタイム  $C_{yA}(L)$  および  $C_{yB}(L)$  (秒/回) はそれぞれ (10)、(11) 式となり、図－6 のようになる。

$$C_{yA}(L) = L\left(\frac{1}{2.37} + \frac{1}{1.28}\right)/2 + 252.28 \quad (10)$$

$$C_{yB}(L) = L\left(\frac{1}{0.85} + \frac{1}{0.48}\right)/2 + 278.38 \quad (11)$$

ここで、1 サイクル当りの平均荷掛け材積を、列状間伐の場合は 今回の両調査地に近い 0.4 m<sup>3</sup>/回、小面積皆伐を想定した場合は 0.8 m<sup>3</sup>/回とする。(2) 式より 1 日の実働時間を 6 時間としたときの労働生産性 (m<sup>3</sup>/日) をそれぞれ計算した結果、図－7 のようになった。ただし、荷掛けなどの時間  $T_{lu}$  (秒/回) は観測結果より表－5 のとおりとした。最大集材距離が長くなるほど労働生産性は下がるが、WF と NR を比較すると、最大集材距離が長くなるほど WF の方が労働生産性が高く、また荷掛け材積が大きくなるほど両者の差は大きくなった。図－7 の平

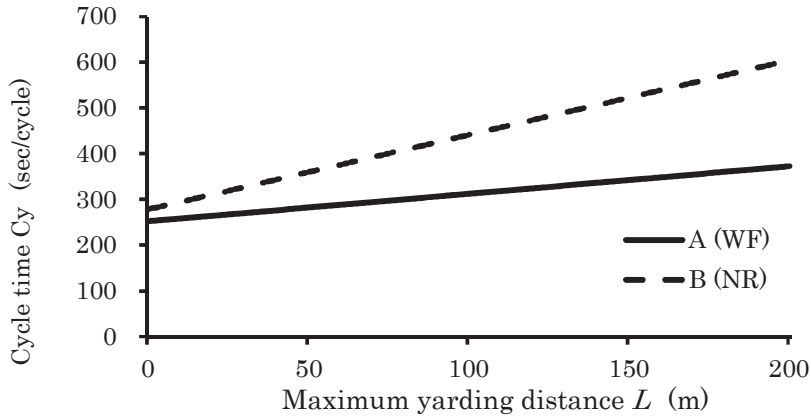
表－5 集材作業の観測結果 (2)  
Table 5. Observation results of yarding operation (2)

		調査地 A	調査地 B
搬器空走行速度 ( m/秒 )	$v_1$	2.37	0.85
搬器実走行速度 ( m/秒 )	$v_2$	1.28	0.48
集材 1 回当りのフック上げ, 索をつかむための移動, 索引き出し, 荷掛け, 退避, 索巻き上げ, 荷下ろし, 荷外し ( 秒/回 )	$T_{LU}$	252.28	278.38
( 内訳 )			
フック上げ ( 秒/回 )		20.81	11.91
索をつかむための移動 ( 秒/回 )		10.67	17.86
索引き出し ( 秒/回 )		33.48	35.56
荷掛け ( 秒/回 )		55.30	80.45
退避 ( 秒/回 )		29.00	19.22
索巻き上げ ( 秒/回 )		79.60	54.95
荷下ろし ( 秒/回 )		13.29	13.48
荷外し ( 秒/回 )		10.14	44.97
作業員の元柱までの行きの移動歩行速度 ( m/秒 )	$v_3$	0.3	0.3
作業員の先柱までの帰りの移動歩行速度 ( m/秒 )	$v_4$	0.3	0.3
架設時間 ( 秒/回 )	$T_s$	10800	4233
撤去時間 ( 秒/回 )	$T_d$	7200	3301
フック上げ, 索をつかむための移動, 索引き出し, 荷掛け, 退避, 索巻き上げ, 荷下ろし, 荷外しは各調査地の計測値の平均値である。 歩行速度 0.3 m/秒は調査地 A と B での計測値のそれぞれの平均値である。			

均荷掛け材積  $0.4 \text{ m}^3$  に対して, 調査地 A の最大集材距離 100 m, 調査地 B の最大集材距離 64 m のときの労働生産性を見ると, それぞれ  $27.66 \text{ m}^3/\text{日}$ ,  $22.58 \text{ m}^3/\text{日}$  であり, 表－4 の実際の労働生産性に近いことが確認できる。

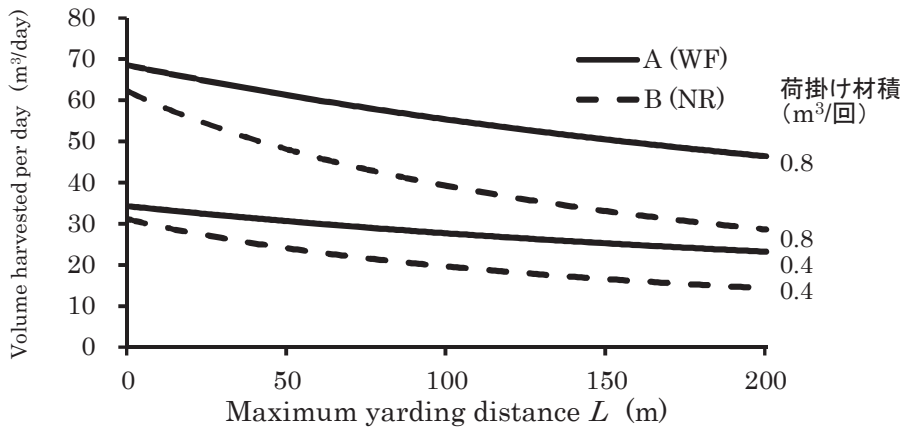
### 3.2 架設・撤去費も含む作業費用

架設・撤去作業時間の観測値 (表－5) を (9) 式に代入し, 図－5 の伐区モデルにおける列



図－6 最大集材距離とサイクルタイムの関係

Fig.6. Relationship between maximum yarding distance and cycle time



図－7 最大集材距離と生産性との関係

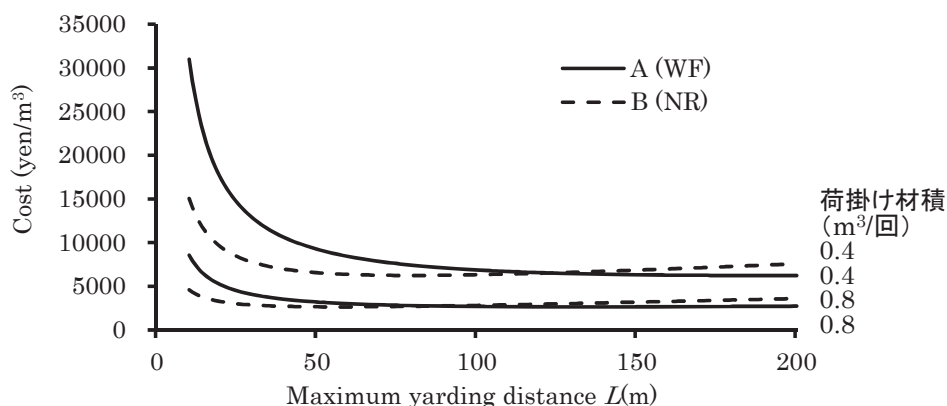
Fig.7. Relationship between maximum yarding distance and productivity

状態伐を想定し、 $Vh = 165 \text{ m}^3/\text{ha}$  とすると、最大集材距離  $L$  (m) に対して、WF の架設・撤去費  $Csd(WF)(L)$  (円/ $\text{m}^3$ ) と NR の架設・撤去費  $Csd(NR)(L)$  (円/ $\text{m}^3$ ) はそれぞれ

$$Csd(WF)(L) = 275482.09/L + 204.06 \quad (12)$$

$$Csd(NR)(L) = 115304.56/L + 204.06 \quad (13)$$

となる。



図－8 集材作業費と架設・撤去費の合計

Fig.8. The sum of yarding, rigging and dismantling costs

また、小面積皆伐の場合は、 $Vh = 660 \text{ m}^3/\text{ha}$  とすると以下のようなになる。

$$Csd(WF)(L) = 68870.52/L + 51.02 \quad (14)$$

$$Csd(NR)(L) = 28826.14/L + 51.02 \quad (15)$$

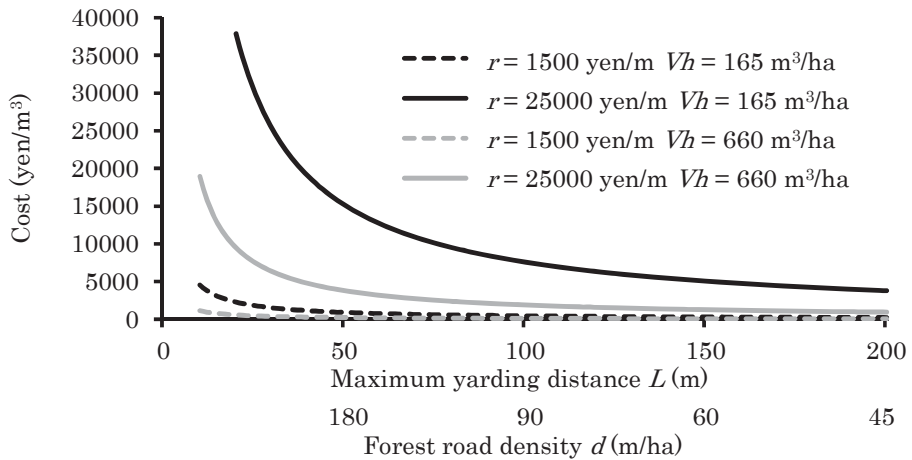
最大集材距離  $L$  (m) に対して、図－7の労働生産性に基づく集材作業費 (円 / $\text{m}^3$ ) と架設・撤去費 (円 / $\text{m}^3$ ) の合計は図－8のようになる。皆伐は出材量が多いため、架設・撤去費を含めた費用は列状間伐の約半分であることがわかる。WFはNRに比べて搬器走行速度が大きいいため生産性は高いものの (図－7)、機械価格が高く、主索固定式 (スタンディングスカイライン式) であることから架設撤去に時間を要した。このことにより、列状間伐では最大集材距離が123 m以下のとき、また皆伐では最大集材距離88 m以下のときにNRが費用面で有利となった。換言すれば、集材距離が短かければNRが、長ければWFが費用面で有利であり、その分岐点となる  $L$  は、平均荷掛け材積が大きくなるほど小さな値となった。また、平均荷掛け材積が大きくなると、WFとNRの差は小さくなった。

### 3.3 路網費

次に、路網整備が不十分な林分を想定し、図－5の伐区モデルにおいて、路網の開設効果を高めるためにも、路網を開設しながら道路沿いにタワーヤードで順次、列状間伐や皆伐を行っていく場合を想定する。

このとき、1本の架線に対して、路網開設量は図－5より  $L_s$  (m) となり、単位材積当りの路網開設費  $P_{FRC}(L)$  (円 / $\text{m}^3$ ) は次式となる。

$$P_{FRC}(L) = \frac{10000 \cdot r \cdot L_s}{Vh \cdot L_s \cdot 2L} \quad (16)$$



図－9 最大集材距離と単位材積当りの路網開設費

Fig.9. Relationship between maximum yarding distance and forest road network construction cost (yen/m³)

ただし、 $r$ ：路網単価（円/m）。 $r$ は開設費用と維持管理費用で構成されるものとし、事業の中で開設費用の負担を重視しなければならない場合は開設費用のウェイトが大きくなり、路網が長期にわたって繰り返し利用されるものとすれば開設費用のウェイトは小さくなる（酒井，1987）。ここでは事業として開設費用の負担を重視して、 $r$ （円/m）として、幅員3mで林地傾斜 $30^\circ$ のときの開設費1500円/mの簡易な森林作業道（SON *et al.*, 2014）と、林業専用道規格相当路線の定額事業費である25000円/mを想定する（長野県森林整備加速化・林業再生協議会路網部会，2015）。

単位面積当りの出材材積  $Vh$  を前記の列状間伐  $165 \text{ m}^3/\text{ha}$ 、小面積皆伐  $660 \text{ m}^3/\text{ha}$  と想定して、単位材積当りの路網開設費  $P_{FRC}(L)$ （円/m³）を求めると図－9になる。図－9より、路網開設単価と出材材積が路網費用に対して大きな影響を及ぼしていることが確認される。なお、図－9以下には、最大集材距離  $L$ （m）に対して、路網密度  $d$ （m/ha）を次式から求め（酒井，1987）、密度の目安として併記した。

$$d = 5000 \times (1 + \eta) / L \quad (17)$$

ただし、 $\eta$ ：迂回率。本論では既往の研究により  $\eta = 0.8$  とする（SAWAGUCHI *et al.*, 1994）。

荷掛け材積を  $0.4 \text{ m}^3/\text{回}$ （列状間伐）、 $0.8 \text{ m}^3/\text{回}$ （皆伐）に設定し、タワーヤードの架設・撤去費を含めた集材費（円/m³）と上記の単位材積当りの路網開設費（円/m³）を合計した費用を図－10、図－11に示す。

機械による路網費用の違いはないため、最大集材距離に応じた両機種の有利・不利は図－8と同じである。路網費用を含めると、荷掛け材積が調査地の値に近い  $0.4 \text{ m}^3/\text{回}$  では、路網費用が1500円/mの場合、最大集材距離が200mのときWFの最小合計費用6463円/m³が得られ、最大集材距離が94mのときNRの最小合計費用6767円/m³が得られた。図中矢印で示すよう

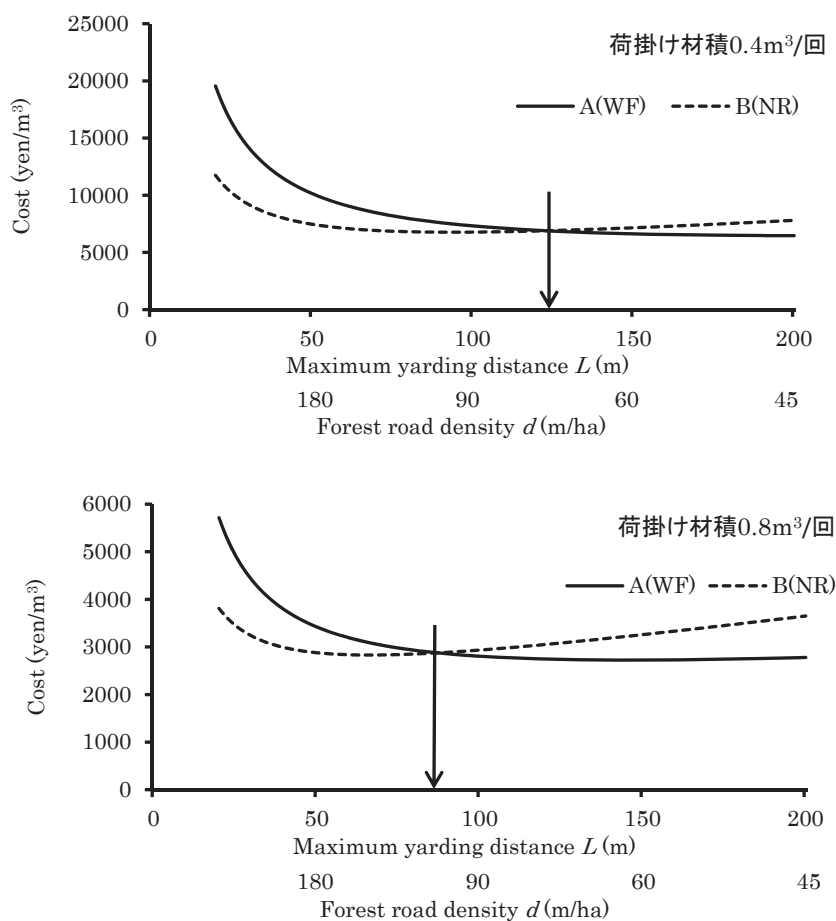


図-10 集材費用と路網開設費の合計 (1)

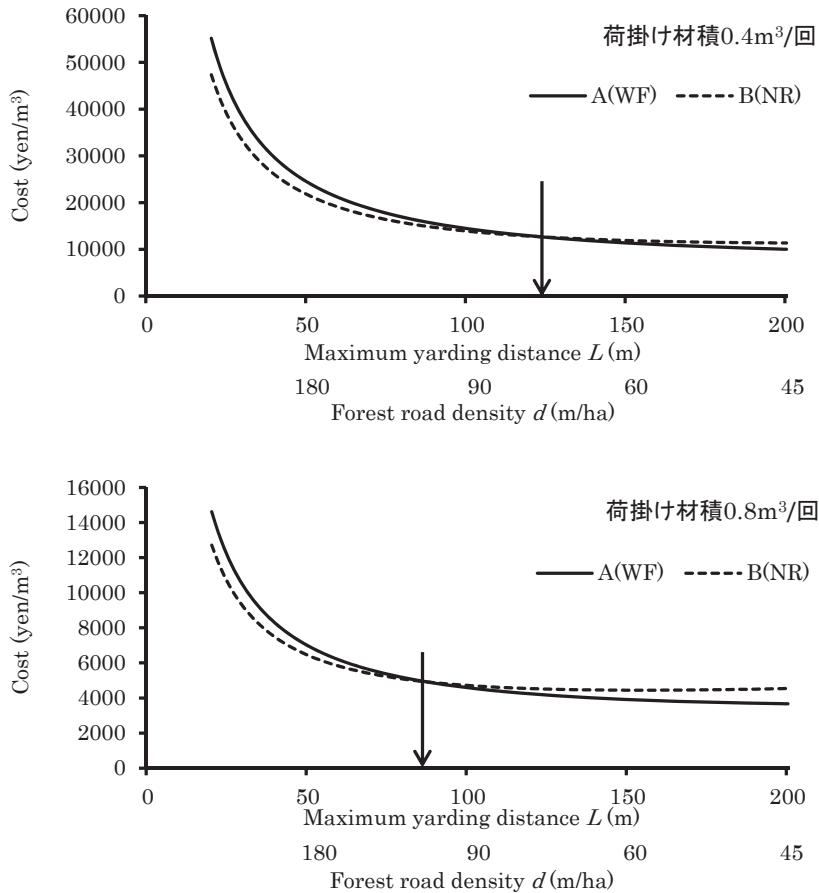
Fig.10. The sum of yarding costs and forest road network construction cost (1)

森林作業道開設単価 1500 円/m の場合

The case of a 1500 yen/m forest road construction cost

に、図-8と同様、最大集材距離が123 mより短ければNRが、長ければWFが費用的に有利になる。荷掛け材積が0.8 m³/回になると、最大集材距離が146 mのときWFの最小合計費用2725 円/m³、最大集材距離が66 mのときNRの最小合計費用2830 円/m³が得られ、荷掛け材積0.4 m³/回のときに比べて、合計費用は約42%に低減した。図中矢印で示すように、最大集材距離が88 mより短ければNRが、長ければWFが費用的に有利になる。

しかし、路網費用を25000 円/mとしたときは、荷掛け材積が0.4 m³/回、0.8 m³/回とも路網費用の影響が非常に大きく、WFとNRの違いは相対的にわずかになり、最大集材距離が大きいほど合計費用は単調に減少した。荷掛け材積が調査地の値に近い0.4 m³/回では、最大集材距離



図－11 集材費用と路網開設費の合計 (2)

Fig.11. The sum of yarding costs and forest road network construction cost (2)

林業専用道開設単価 25000 円 /m の場合

The case of a 25000 yen/m forest road construction cost

が 200 m のとき、WF の最小合計費用 10024 円 /m³、NR の最小合計費用 11365 円 /m³ が得られた。荷掛け材積が 0.8 m³/回になると、最大集材距離が 200 m のときの WF の最小合計費用が 3669 円 /m³、最大集材距離が 154m のときの NR の最小合計費用が 4445 円 /m³ となり、荷掛け材積 0.4 m³/回 のときに比べて、合計費用は約 37 ～ 39% に低減した。このことから、現状の材価では、林業専用道クラスの道は伐区を大きくして皆伐しないかぎりタワーヤードの 1 本の集材架線では開設費を負担しえないことが容易に確認される。

現実として、長期にわたって路網を繰り返し使用するものとすれば、集材作業 1 回当たりの  $r$  は小さくなる。林業全体の基盤整備の観点から集材作業費に路網開設費は含めないという考え方もある (酒井, 2004)。この考え方に基づくと、路網費用における維持管理のウェイトが高くな



るが、集材作業の費用は結局図－8に示すものとなる。

したがって、荷掛け材積が $0.4 \text{ m}^3/\text{回}$ の場合には最大集材距離が $123 \text{ m}$ 以下ならばNRがコスト的に有利になるが、集材作業費と架設・撤去費の合計はWF、NRとも $6000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 以上となり、このほかにトラック輸送費や造材費、間接費などを負担しなければならないので、現在の材価で採算をとるためには荷掛け材積を大きくしたりするなどの工夫が必要である。

また、今後のNRの改善点として、搬器走行速度を大きくしたり、1サイクルの荷掛け材積を増やしていくべきであることが推察される。なお、今回、NRよりも搬器走行速度が大きいWFにおいて搬器走行速度の大きさが荷掛け作業に及ぼす影響はみられなかったが、搬器走行速度を大きくする場合、短距離では荷掛けの準備が追いつかなくなることが予想され、荷掛け手の労働負荷の面からの検討も必要である。WFについては、普及のためには機械価格の低減が課題になり、普及台数の増加にともなうサービス体制の整備が望まれる。なお、高額な輸入機械は為替にも大きく影響され、ライセンス生産することができれば望ましい。

#### 4. おわりに

WFとNRを比較すると、WFはNRに比べて搬器走行速度が大きいいため、最大集材距離が長くなるほどWFの方が労働生産性が高く、また荷掛け材積が大きくなるほど両者の差は大きくなった。しかし、WFは機械価格が高く、架設撤去にも時間を要したため、最大集材距離が $123 \text{ m}$ 以下の列状間伐と最大集材距離が $88 \text{ m}$ 以下の皆伐ではNRが有利となった。集材距離が短く、荷掛け材積が小さいときに、費用面ではNRの方が有利となる傾向がある。

森林作業道の列状間伐では、路網費用を含めた合計費用は $6500 \text{ 円}/\text{m}^3$ 前後になってしまうが、荷掛け材積が $0.8 \text{ m}^3/\text{回}$ の皆伐ならば、 $3000 \text{ 円}/\text{m}^3$ 以下が実現可能である。林業専用道になると皆伐前提でも路網費用を含めた合計費用は $3669 \text{ 円}/\text{m}^3 \sim 4445 \text{ 円}/\text{m}^3$ となった。

急傾斜地の集材作業では架線系林業機械が不可欠であり、そのためにはくり返しの長期の利用を前提とした路網整備が必要であり、荷掛け材積を大きくするのが有用である。

調査に際して、香美森林組合ならびに石央森林組合にご協力いただいた。深甚の謝意を表します。

#### 要旨

オーストリアMAYR-MELNHOF FORSTTECHNIK社製WANDERFALKE U-AM-2to（以下WFと略記）とIHI建機社製NR301（以下NR）の作業観測を行い、その労働生産性と作業費用、最適路網密度について分析した。最大集材距離が長くなるほど労働生産性は下がるが、WFとNRを比較すると、サイクルタイムの影響を受けて最大集材距離が長くなるほどWFの方が労働生産性が高く、また荷掛け材積が大きくなるほど両者の差は大きくなった。WFはNRに比べて機械価格が高く、架設撤去に時間を要したため、最大集材距離が $123 \text{ m}$ 以下の列状間伐と最大集材距離が $88 \text{ m}$ 以下の皆伐ではNRが費用面で有利と計算された。タワーヤードを導入して作業費用を低減するには、長期にわたって路網をくり返し使用し、1回当りの荷掛け材積を大きくするのが有用である。

キーワード：タワーヤード・集材作業・労働生産性・作業費用・最適路網密度

### 引用文献

- 藤田亮（1999）タワーヤード作業の分析：集材工期について．鳥取林試報 37：1-7.
- KIM, M.K. and PARK, S.J. (2012) An analysis of the operational time and productivity in the whole-tree and cut-to-length logging operation system. J. Korean For. Soc. 101 (3) : 344-355. (In Korean with English abstract)
- KIM, M.K. and PARK, S.J. (2013) An analysis of the operational cost in the whole-tree and cut-to-length logging operation system. J. Korean For. Soc. 102 (2) : 229-238. (In Korean with English abstract)
- 木幡靖夫・夏目俊二・由田茂一・湊克之（1999）タワーヤード集材作業における架線伐開幅の影響．北大演報 56 (1) : 41-54.
- 長野県森林整備加速化・林業再生協議会路網部会（2015）林業専用道規格相当路線：平成 24-25 年度実施の路線調査．37pp, 長野県森林整備加速化・林業再生協議会路網部会, 長野県.
- 中澤昌彦・吉田智佳史・佐々木達也・陣川雅樹・田中良明・鈴木秀典・上村巧・伊藤崇之・山崎敏彦・大矢新次郎・古川邦明・今富裕樹（2012）先進林業機械として導入されたタワーヤードによる間伐作業システムの開発：架線下における上げ荷集材作業の生産性．森利誌 27 (3) : 175-178.
- 中澤昌彦・吉田智佳史・佐々木達也・陣川雅樹・田中良明・鈴木秀典・上村巧・伊藤崇之・山崎敏彦（2015）欧州製中距離対応型タワーヤードによる間伐作業システムの開発：上げ荷横取り集材作業の生産性．森利誌 30 (1) : 29-34.
- 岡勝・井上源基・小林洋司（2005）稼働実績をもとにした高性能林業機械の損料率の算定．森利誌 20 (3) : 183-191.
- 朴相俊・岩岡正博・酒井秀夫・小林洋司（1994）タワーヤードによる間伐作業システムと適正路網密度．東大演報 92 : 175-197.
- 朴相俊・小林洋司・酒井秀夫（2003）タワーヤードによる集材作業における架線張力の分析．森利誌 18 (1) : 21-28.
- 酒井秀夫（1987）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．東大演報 76 : 1-85.
- 酒井秀夫（1997）高性能林業機械による作業システムの生産費．森利誌 12 (3) : 203-208.
- 酒井秀夫（2004）作業道：理論と環境保全機能．281pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- SAWAGUCHI, I., OHKAWABATA, O., and ICHIHARA, K. (1994) Characteristics of forest-road network correction factors in mountainous forests in Japan (I) Forest-road network adjustment. J. Jpn. For. Soc. 76 (2) :118-215.
- SON, J., SAKURAI, R., NITAMI, T., and SAKAI, H. (2014) Development of a method of forest road network planning using GIS that discriminates and avoids dip slopes. Bull. Univ. of Tokyo For. 130:1-13.
- SRIPRARAM, D. (2001) Optimal planning method for logging operation operated by mobile tower yarders. Bull. Utsunomiya Univ. For. 37 : 1-70.
- 田坂聡明・熊倉由典・峰松浩彦・ダムロンスイパラム（2000）ニューラルネットワーク手法によるタワーヤード集材架線の適正配置法．森利誌 15 (3) : 213-220.
- 時光博史・川元満夫（2008）広島県内民有スギ・ヒノキ林の現況：森林吸収源データ緊急整備事業調査結果から．広島県林技七研報 40 : 19-26.
- 山口智・鈴木秀典・梅田修史・大川畑修（2004）タワーヤード集材における路網計画．森利誌 19 (3) : 217-220.
- 全国林業改良普及協会編（2001）機械化のマネジメント．239pp, 全国林業改良普及協会, 東京.
- (2014 年 12 月 16 日受付)
- (2015 年 9 月 16 日受理)

### Summary

The productivity, operational cost and optimal forest road network density for WANDERFALKE U-AM-2to (WF) and NR301 (NR) industrial tower yarders were analyzed. The results showed clearly that productivity decreased as the yarding distance increased. The productivity of the WF became greater than that of the NR as the yarding distance increased because of the effect of the cycle time. This difference increased as the load volume increased. As the WF yarder had a higher purchase price and it took more time to set up compared to the NR, the NR yarder became advantageous (yen/m<sup>3</sup>) when the maximum yarding distance was less than 123 m in strip-thinning and 88 m in clear-cutting. Therefore, in order to introduce tower yarders to achieve cost reduction, it is effective to increase the load volume during operations and to utilize the road network repeatedly for a long period.

**Keywords:** tower yarder, yarding operation, productivity, operational cost, optimal forest road density