

博士論文

タワーヤードによる集材作業システムと
最適路網密度に関する研究

金 ミンギョ

博士学位論文

タワーヤードによる集材作業システムと
最適路網密度に関する研究

東京大学大学院

農学生命科学研究科 森林科学専攻

金 ミンギョ

2016年 3月

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本論文の目的と構成	1
1.2 韓国および日本の林業機械化の現状とタワーヤーダの必要性	2
1.3 既往の研究	5
第 2 章 タワーヤーダの生産性と費用の理論式	7
第 3 章 韓国の皆伐林におけるタワーヤーダの集材作業システム	10
3.1 概説	10
3.2 調査地と方法	10
3.2.1 対象機種と調査地	10
3.2.2 調査方法	13
3.2.3 分析方法	15
3.3 結果と考察	17
3.3.1 生産性	17
3.3.2 作業費	21
3.4 小括	23
第 4 章 異なる 2 機種 of タワーヤーダによる集材作業の生産性, 費用と最適路網密度	24
4.1 概説	24
4.2 調査地と方法	24
4.2.1 対象機種と調査地	24
4.2.2 調査方法	34
4.2.3 分析方法	34
4.3 結果と考察	37
4.3.1 生産性	37
4.3.2 作業費	41
4.3.3 路網費	41
4.4 小括	48
第 5 章 韓国におけるタワーヤーダによる集材作業と最適路網密度の検討	49
5.1 概説	49
5.2 方法	49
5.2.1 対象機種と集材作業地	49
5.2.2 分析方法	49
5.3 結果と考察	50
5.3.1 生産性	50
5.3.2 作業費	53
5.3.3 路網費	56
5.4 小括	63
第 6 章 終論	65
引用文献	68
要旨	71

表目次

表-1.1	韓国の林業機械保有台数	3
表-1.2	日本の林業機械保有台数	4
表-3.1	タワーヤーダ RME-300T の諸元	11
表-3.2	調査地の概要.....	14
表-3.3	集材作業費の算出に使用した値	16
表-3.4	集材作業の観測結果 (1)	17
表-3.5	集材作業の観測結果 (2)	18
表-4.1	供試タワーヤーダ WF と NR の諸元	25
表-4.2	調査地の概要.....	31
表-4.3	集材作業費の算出に使用した値	36
表-4.4	集材作業の観測結果 (1)	38
表-4.5	集材作業の観測結果 (2)	39
表-5.1	集材作業費の算出に使用した値	51

図目次

図-3.1	タワーヤーダ RME-300T	12
図-3.2	調査地	15
図-3.3	最大集材距離とサイクルタイムの関係	19
図-3.4	最大集材距離と生産性との関係	20
図-3.5	集材作業費と架設・撤去費の合計	22
図-4.1	タワーヤーダ WANDERFALKE U-AM-2to	26
図-4.2	WANDERFALKE U-AM-2to の索張り方式（上げ荷集材）	27
図-4.3	タワーヤーダ NR301	28
図-4.4	NR301 の索張り方式	29
図-4.5	調査地 A	32
図-4.6	調査地 B	33
図-4.7	列状間伐モデル伐区	35
図-4.8	最大集材距離とサイクルタイムの関係	40
図-4.9	最大集材距離と生産性との関係	40
図-4.10	集材作業費と架設・撤去費の合計	45
図-4.11	最大集材距離と単位材積当りの路網開設費	45
図-4.12	集材費用と路網開設費の合計（1）	46
図-4.13	集材費用と路網開設費の合計（2）	47
図-5.1	最大集材距離とサイクルタイムの関係	52
図-5.2	最大集材距離と生産性との関係	52
図-5.3	集材作業費と架設・撤去費の合計	55
図-5.4	最大集材距離と単位材積当りの路網開設費	57
図-5.6	集材費と路網開設費の合計（カラマツ林）	59

第 1 章 序論

1.1 本論文の目的と構成

韓国は国土面積全体の 63.9%が森林面積であり，森林のほとんどは 1970 年代に集中的に植林したものである。21 年生以上の森林は約 87%で，収穫時期である 31 年生以上の森林は約 65%である。まだ成長が旺盛な森林として森作り，間伐事業等が必要な状況である。また，韓国山林庁は木材自給率を 2014 年の 16.7%から 2017 年まで 21%に増大する方針を推進している（山林庁，2015b）。今後地球温暖化，二酸化炭素排出権などの気候変動に対応する環境問題と連係して健康な森林の造成と木材資源の確保のために間伐事業等の推進が必要とされている。一方，農山村の人口減少及び高齢化等によって林業労働力の確保が困難な状況であるため，森林作業において生産性の向上と労働環境の改善が必要であり，そのためには林業機械化が必要とされている。

韓国は 1967 年に山林庁が開庁され，森林作業が始められた。1970 年代の鋸と鎌による森林作業から，1980 年代にはチェーンソーの普及が始まった。また，1985 年にはオーストリアからタワーヤーダ（Koller 社，K-300）を導入し，1990 年代に日本からヤーダ集材機（Iwafuji 社，Y-28DE），自走式搬器（Iwafuji 社，BCR 08SP）などを導入した。1997 年度にはトラクタ集材機（山林組合，HAM200）を開発し，2000 年代からは大型林業機械による森林作業時代が到来した。

林業機械の活用等によって林業の生産性を向上させていくためには，その作業現場に適合する林業機械や作業システムを考えて路網を整備していくことが重要である。一方，現在韓国の林道密度は約 2.9 m/ha であり，これに対し，ドイツは 46 m/ha，オーストリアは 45 m/ha，日本は 13 m/ha である（山林庁，2015a）。

また，急傾斜地が多い韓国の森林作業条件では傾斜地でも作業が可能である架線系林業機械が不可欠であり，そのためにはタワーヤーダの活用が重要と考えられる。

本論文では、韓国と日本で行われているタワーヤーダによる集材作業システムの生産性と作業費を分析し、必要な路網整備について考察を行うことを目的とする。

本論文は本章以下 6 章から成る。第 2 章ではタワーヤーダの生産性と作業費の算出に使用する理論式を策定する。第 3 章では韓国で行われているタワーヤーダによる集材作業システムの生産性と作業費を分析する。第 4 章では日本で行われているタワーヤーダによる集材作業システムの生産性と作業費用を分析し、集材作業に必要な路網整備について考察を行う。第 5 章では日本で行われているタワーヤーダによる集材作業システムを韓国で行うことを想定し、生産性・作業費を分析し、路網整備について考察を行う。第 6 章では 3 章から 5 章の結果を踏まえて考察と提言を行う。

1.2 韓国および日本の林業機械化の現状とタワーヤーダの必要性

近年の韓国と日本における林業機械の普及台数を表-1.1 および表-1.2 に示す（山林庁, 2015b ; 林野庁, 2015）。韓国におけるトラクタ集材機とは、農業用トラクタに集材タワーを装着し、タワーヤーダと同じように架線系集材作業を行う。トラクタ集材機とタワーヤーダの合計台数とほぼ同じであるのがグラップル付きバックホウであるが、架線系集材機と比べて急傾斜地では作業ができないこと、山の上から下まで移動しながら重力を利用し、3~4m の短幹材を押ししたり投げたりして集材する方式であるため、上げ荷集材はできず、下げ荷集材に限られること、全木・全幹集材ができずに短幹集材に限られること、間伐では作業ができないことなどの欠点がある。バックホウの林地走行は土砂流出が原因となって発生する環境問題のおそれがあり（KIM and PARK, 2012 ; KIM and PARK, 2013）, これからバイオマス利用を考えるとタワーヤーダによる全木・全幹集材作業システムが重要であると考えられる。

一方、日本においては、第 2 次大戦後、拡大造林期に植栽された林木の大径材化、集約化施業の普及による団地の大面積化などの傾向を受け、欧州製の主索固定式（ス

タンディングスカイライン式)を採用した中型・大型のタワーヤーダが注目されるようになってきた(仁多見, 2010)。さらに,平成 21 年度林野庁補助事業「先進林業機械の導入・改良事業」によるタワーヤーダの導入事例報告もされている(中澤ら, 2012; 中澤ら, 2015)。

表-1.1 韓国の林業機械保有台数

Table 1.1. Forestry machines in Korea

(単位:台)

	2010	2011	2012	2013	2014
トラクタ集材機	92	118	118	130	153
バックホウ集材機	34	39	48	59	71
フォワーダ	20	25	29	36	36
タワーヤーダ	15	19	24	31	30
プロセッサ	3	4	4	4	6
スキッダ	1	2	3	4	4
グラップル付きバックホウ	83	133	161	178	186
計	248	340	387	442	486

表-1.2 日本の林業機械保有台数

Table 1.2. Forestry machines in Japan

(単位：台)

	2009	2010	2011	2012	2013
フェラーバンチャ	69	85	101	113	123
ハーベスタ	722	836	924	1075	1174
プロセッサ	1238	1312	1369	1451	1484
スキッダ	141	141	142	148	142
フォワーダ	1083	1213	1349	1513	1724
タワーヤード	155	148	149	143	149
スイングヤード	655	708	752	810	851
その他の高性能林業機械	131	228	303	425	581
計	4194	4671	5089	5678	6228

1.3 既往の研究

タワーヤードとは、伐り倒した木を森林内から道沿いまで集めるための集材機械である。トラックやトレーラをベースマシンとして、集材用のウィンチとワイヤロープを高く張り上げるためのタワーを装備している。従来の架線集材機械に比べ、必要とする機材が少なく設置が容易である。

韓国におけるタワーヤードによる集材作業システムの生産性に関する研究として、適切な主索架設間隔・横取り距離・集材距離について基礎資料を提供した研究(PARK, 2004a ; PARK, 2004b)と、人力・トラクタ集材機・タワーヤードによる集材作業の生産性と集材費用を比較・分析し、人力よりも機械による集材作業の優越性を証明した研究がある (KIM and PARK, 2010)。また、タワーヤードおよびスイングヤードによる全木集材システムとグラップル付きバックホウによる短幹集材システムを分析し、それぞれの生産性・作業費用を明らかにした研究(KIM and PARK, 2012 ; KIM and PARK, 2013)、タワーヤード・トラクタ集材機・トラクタウィンチの生産性と作業費用を分析し、作業条件に応じて適切な作業システムを選定した研究(HAN *et al.*, 2014)がある。このように韓国においてタワーヤードによる集材作業に関する研究が行われているが、タワーヤードによる集材作業と路網密度に関する研究は多くない。

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。2010 年前後より欧州製タワーヤードの再検討が進み、中澤らは上げ荷集材作業を中心に分析し、集材作業時間は荷掛量との間に明確な傾向がなく、集材距離と高い相関関係にあることを明らかにした上で上げ荷集材作業の生産性予測式を導出した (中澤ら, 2012)。また、横取り集材の荷上げ作業時間は、荷掛量との間に明確な傾向がなく、横取り距

離と高い相関があることを明らかにし、上げ荷横取り集材作業の生産性予測式を導出した（中澤ら，2015）。2013年には日本製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。

第2章 タワーヤードの生産性と費用の理論式

本章では、分析に用いるタワーヤードの生産性と作業費用を理論式を整理しておくことにする。モデルとして伐区が道路や土場に接し、集材距離 0 m から最大集材距離 L (m) まで均等に集材するものとする。この場合、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。

$$Cy(L) = L(1/v_1 + 1/v_2)/2 + T_{LU} \quad (2.1)$$

ただし、 $Cy(L)$: 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 200 m とする。 v_1 , v_2 : 搬器の空走行と実走行の速度 (m /秒) , T_{LU} : 集材 1 回当たりのフック上げ、索をつかむための移動、フック下げ、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 回当たり積載量を乗じて 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 (m^3 /日) $P(L)$ は (2.2) 式のとおりとなる。

$$P(L) = (60 \times 60 \times H / Cy(L)) \cdot V_t \quad (2.2)$$

ただし、 V_t : 1 回当たり積載量 (m^3 /回) , H : 1 日当り実働時間 (ここでは 6 時間とする) 。 v_2 は V_t 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 1 回当たり積載量との間に明確な関係がないものとする。

時間当たり作業費用 (円/時または won/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 (m^3 /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) 。集材作業費に関わる数値は各章で記述するが、既往の研究 (全国林業改良普及協会編, 2001 ; 岡ら,

2005 ; KIM and PARK, 2013 ; 大韓建設協会, 2015 ; 韓国石油公社, 2015) に基づいて求めることにし, 最大集材距離に対する作業費用 (円/ m³ または won/ m³) 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。

$$\text{償却費 (円/時または won/時)} = \frac{\gamma \times I}{X} \quad (2.3)$$

$$\text{管理費 (円/時または won/時)} = \frac{\varepsilon_C \times I}{X_n} \quad (2.4)$$

$$\text{資本利子 (円/時または won/時)} = \frac{(\omega - \frac{1}{n}) \times I}{X_n} \quad (2.5)$$

$$\omega = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.6)$$

ただし, γ : 償却費率, I : 機械価格 (円または won) , X : 機械耐用時間 (時) , ε_C : 年間機械管理費率, X_n : 年間稼働時間 (時/年) , ω : 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。

$$\text{保守・修理費 (円/時または won/時)} = \frac{(\varepsilon_A + \varepsilon_B) \times I}{X} \quad (2.7)$$

$$\text{燃料・油脂費 (円/時または won/時)} = Q \times Q_C \times (1 + q) \quad (2.8)$$

ただし, ε_A : 現場修理費率, ε_B : 定期整備費率, Q : 燃料消費量 (ℓ/時) , Q_C : 燃料単価 (円/ℓ または won/ℓ) , q : 燃料費に対する潤滑油等の油脂費率。

タワーヤード集材作業において, 副作業費は架線の架設・撤去費, 路網費で構成される。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 (ここではタワーヤードの設置間隔) に基づいて求め, 出材材積当りの架設・撤去費 $Csd(L)$ (won/ m³) を次式より求めることにする。

$$Csd(L) = ((L \cdot (\frac{1}{v_3} + \frac{1}{v_4}) + Ts) + (L \cdot (\frac{1}{v_3} + \frac{1}{v_4}) + Td)) \cdot \frac{\frac{Cd}{3600}}{(\frac{Vh \cdot Ls \cdot L}{10000})} \quad (2.9)$$

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) ， Ts ：架設時間 (秒/回) ， Td ：撤去時間 (秒/回) ， Cd ：架設・撤去作業の作業員の労務費 (円/時または won/時) ， Vh ：ha 当り出材材積 (m³/ha) ， Ls ：伐採列間の距離に基づくタワーヤードの設置間隔 (m) 。

第3章 韓国の皆伐林におけるタワーヤーダの集材作業システム

3.1 概説

韓国は 1985 年にオーストリアからタワーヤーダ (Koller 社, K-300) を導入し, 1990 年代に日本からヤーダ集材機 (Iwafuji 社, Y-28DE), 自走式搬器 (Iwafuji 社, BCR 08SP) などを導入した。1997 年度にはトラクタ集材機 (山林組合, HAM200) を開発し, 2000 年代からは大型林業機械による森林作業時代が到来した。タワーヤーダの普及台数は 2010 年の 15 台から 2014 年の 30 台になり, 増加している。しかし, 木材収穫においてタワーヤーダによる集材作業に関する研究は多くない。一方, 日本から韓国の集材作業現場に導入されているタワーヤーダ (RME-300T) がある。そのタワーヤーダを対象に, 集材作業システムの生産性や費用の分析を行った。

3.2 調査地と方法

3.2.1 対象機種と調査地

調査対象とするタワーヤーダは, 及川自動車 (株) 社製 RME-300T (以下 RME と略記) である。諸元を表-3.1 に示す。エンジン出力は 87kW であり, 中型機種といえる。索張り方式は 2 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。供試機は 6 輪駆動の車両をベースマシンとし, 自走可能である (図-3.1)。

表-3.1 タワーヤード RME-300T の諸元

Table 3.1. Specifications of the investigated tower yarder RME-300T

機種名	RME-300T
製造	及川自動車株式会社
機械質量 (kg)	6700
全長 (mm)	5300
全幅 (mm)	1800
全高 (mm)	2615
タワー高さ (m)	伸 9, 縮 5
エンジン出力 (kW, ps, rpm)	64, 87, 2300
直引力 (kgf)	1500
ウィンチけん引速度 (m/秒)	3.67
設計最大集材距離 (m)	300



図-3.1 タワーヤーダ RME-300T

調査は2010年9月8日～9日に韓国忠清南道公州市利仁面新興里で行った（表-3.2）。

調査地は21～30年生のリギダマツの人工林であり、本数伐採率100%の皆伐が行われた（図-3.2）。タワーヤーダによる集材作業の集材距離は20～104 m、横取り距離は0～20 mであった。作業システムは、チェーンソーによる先行伐倒後、タワーヤーダによる全木材下げ荷集材が行われ、集材された材はグラップル付きバックホウとチェーンソーによって林道沿の土場で造材・整理された。その材はフォワーダまたはトラックで搬出された。

各作業の人員数はチェーンソーによる伐倒作業1人、タワーヤーダによる集材作業3人（タワーヤーダオペレータ1人、荷掛け手1人、荷下し手1人の3人1組）、造材・整理作業2人、フォワーダによる運材1人、トラックによる運材2人（グラップル付きバックホウによる材の積荷作業1人、トラック運転手1人）の合計7～8人である。

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ある。

3.2.2 調査方法

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」、 「フック下げ」、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レーザー距離計（Bushnell社製 Yardage Pro 800 Compact Rangefinder）を用いた。

表-3.2 調査地の概要

Table 3.2. Description of the investigated sites

調査地	
所在	韓国忠清南道公州市利仁面新興里 山 11 番地外 3 筆地
伐区面積 (ha)	11.4
平均傾斜 (°)	27
林種	人工林
樹種	リギダマツ
林齡 (年)	21~30
平均胸高直径 (cm)	16
平均樹高 (m)	10
平均幹材積 (m ³ /本)	0.145
ha 当り材積 (m ³)	80
ha 当り立木本数 (本)	550
本数伐採率 (%)	100

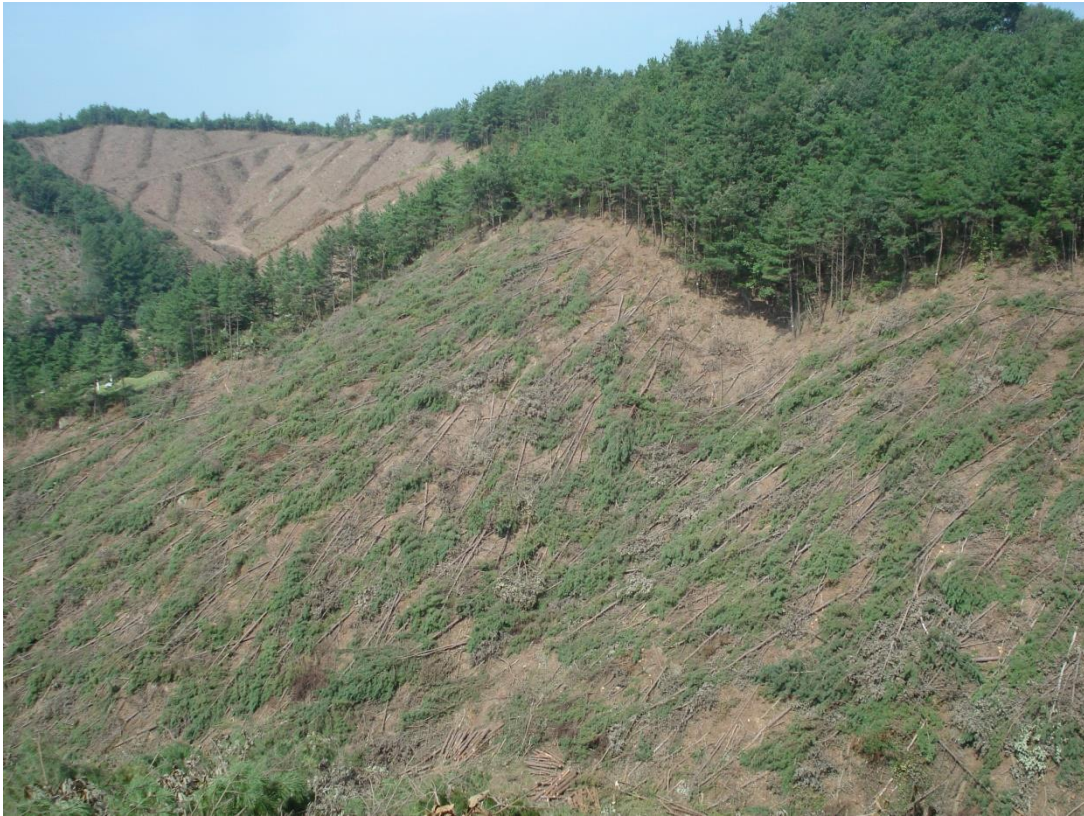


図-3.2 調査地

Fig.3.2. Investigated area

3.2.3 分析方法

本章では作業時間観測に基づいて第 2 章の理論式より生産性を分析し、 Vh を 80 m^3/ha , Ls を 20 m と設定した。集材作業費に関わる数値を表-3.3 に示す。

表-3.3 集材作業費の算出に使用した値
Table 3.3. Values used for calculation of yarding cost

		RME-300T
機械購入価格 (won)	I	150000000
耐用時間 (時)	X	6300
耐用年数 (年)	n	7
1日運転時間 (時)	H	6
年間運転日数 (日/年)	D	150
年間稼働時間 (時/年)	Xn	900
償却費率	γ	0.9
保守・修理費率	$\varepsilon_A + \varepsilon_B$	0.2
年間機械管理費率	ε_C	0.07
調査地における燃料消費量 (ℓ /時)	Q	5
燃料単価 (won/ ℓ)	Q_C	1230
燃料量に対する潤滑油等の油脂費率	q	0.38
年利率	i	0.07
資本利子係数	ω	0.21
調査地の平均生産性 (m^3 /日)	P	20.3
タワーヤーダオペレータの労務費 (won/日)		130411
荷掛け手の労務費 (won/日)		89566
荷下し手の労務費 (won/日)		89566
償却費 (won/時)		21429
管理費 (won/時)		11667
資本利子 (won/時)		7116
保守・修理費 (won/時)		4762
燃料・油脂費 (won/時)		8487
タワーヤーダオペレータの労務費 (won/時)		21735
荷掛け手の労務費 (won/時)		14928
荷下し手の労務費 (won/時)		14928

軽油単価は韓国石油公社 (<http://www.knoc.co.kr/>) の国内油価 (参照 2015 年 11 月 24 日) であり, 労務費は大韓建設協会の 2015 年下半期適用建設業賃金実態報告書のデータである。

3.3 結果と考察

3.3.1 生産性

RMEによる50サイクル，集材本数111本，計16.18 m³の集材作業を観測した。1回当たりの平均集材材積は0.32 m³/回，平均集材時間は344.40秒/回であった。（表-3.4），架設・撤去時間は6367秒であった（表-3.5）。

表-3.4 集材作業の観測結果（1）

Table 3.4. Observation results of yarding operation (1)

測定値	集材回数（回）	50
	集材本数（本）	111
	集材材積（m ³ ）	16.18
	集材時間（秒）	17220
	作業員数（人）	3
1回当たりの平均	集材材積（m ³ /回）	0.32
	集材時間（秒/回）	344.40
1時間当たりの平均	集材回数（回/時）	10.45
	集材材積（m ³ /時）	3.38
1日当たりの平均	集材回数（回/日）	62.72
	集材材積（m ³ /日）	20.30
1人・1日当たりの平均	集材材積（m ³ /人・日）	6.77

表-3.5 集材作業の観測結果 (2)

Table 3.5. Observation results of yarding operation (2)

搬器空走行速度 (m/秒)	v_1	0.86
搬器実走行速度 (m/秒)	v_2	0.76
集材 1 回当りのフック上げ, フック下げ, 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}	215.56
(内訳)		
フック上げ (秒/回)		9.82
フック下げ (秒/回)		15.39
索引き出し (秒/回)		51.44
荷掛け (秒/回)		31.30
退避 (秒/回)		9.26
索巻き上げ (秒/回)		49.29
荷下ろし (秒/回)		8.18
荷外し (秒/回)		40.88
作業員の先柱までの行きの移動歩行速度 (m/秒)	v_3	0.27
作業員の元柱までの帰りの移動歩行速度 (m/秒)	v_4	0.81
架設時間 (秒/回)	T_s	3853
撤去時間 (秒/回)	T_d	2514

フック上げ, フック下げ, 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。歩行速度は調査地の計測値である。

搬器走行速度（表-3.5）は、空車、実車とも設計された走行速度（表-3.1）の3分の1以下であった。この理由として、表-3.1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始めてから停止するまで加減速があり、調査地の集材距離が設計最大集材距離の約3分の1で、短かったことも一因と思われる。

表-3.5の観測値を(2.1)式に代入すると、RMEの平均サイクルタイム Cy_A (L) (秒/回) は(3.1)式となり、図-3.3のようになる。

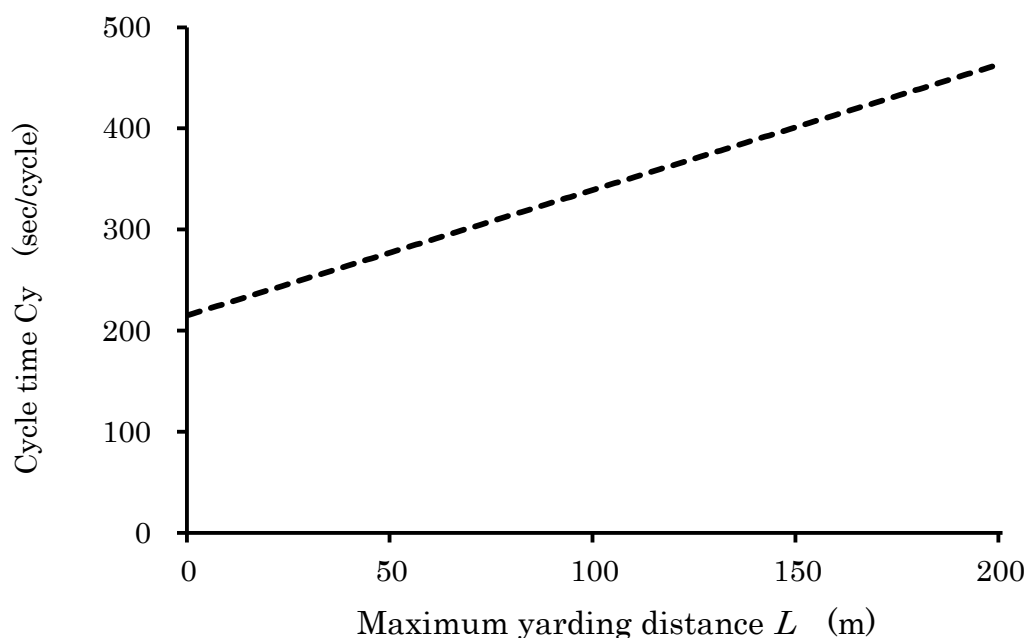


図-3.3 最大集材距離とサイクルタイムの関係

Fig.3.3. Relationships between maximum yarding distance and cycle time

$$Cy_A(L) = L\left(\frac{1}{0.86} + \frac{1}{0.76}\right)/2 + 215.56 \quad (3.1)$$

ここで、1回当たり積載量を、今回の対象作業での値に近い $0.3 \text{ m}^3/\text{回}$ とする。 (2.2)

式より1日の実働時間を6時間としたときの生産性 ($\text{m}^3/\text{日}$) を計算した結果、図-3.4 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-3.5 のとおりとした。最大集材距離が長くなるほど生産性は下がるが、最大集材距離が長くなるほど1回当たり積載量による生産性差は小さくなった。図-3.4の平均1回当たり積載量 0.3 m^3 に対して、調査地の平均集材距離 76 m のときの生産性を見ると、 $20.9 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、表-3.4 の実際の生産性に近いことが確認できる。また、同一機種のタワーヤダを対象にした既往研究 (KIM and PARK, 2010) の結果の生産性 $21.9 \text{ m}^3/\text{日}$ とも近い結果である。

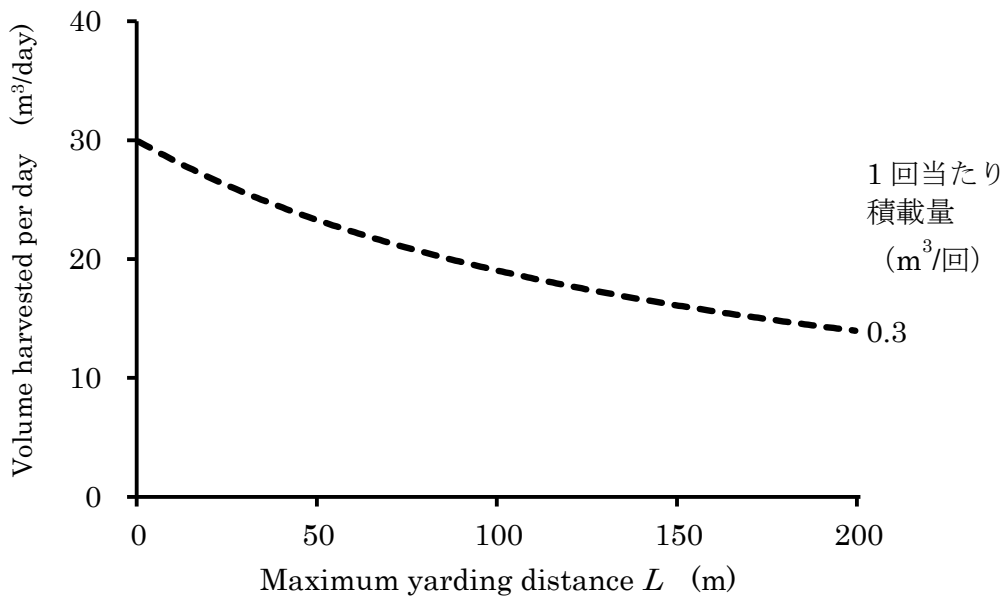


図-3.4 最大集材距離と生産性の関係

Fig.3.4. Relationships between maximum yarding distance and productivity

3.3.2 作業費

架設・撤去作業時間の観測値（表-3.5）を（2.9）式に代入し、皆伐を想定し、 $Vh = 80 \text{ m}^3/\text{ha}$ とすると、最大集材距離 L （m）に対して、RME の架設・撤去費 $Csd(\text{RME})(L)$ （won/m³）は

$$Csd(\text{RME})(L) = 735289.02/L + 1140.99 \quad (3.2)$$

となる。

最大集材距離 L （m）に対して、図-3.4 の生産性に基づく集材作業費（won/m³）と架設・撤去費（won/m³）の合計は図-3.5 のようになる。 $Vh=80 \text{ m}^3/\text{ha}$ の集材作業費（won/m³）と架設・撤去費（won/m³）の合計が最小になる集材距離は 78 m であり、そのときの費用は 40948 won/m³であった。

本章の調査地と同じ調査地で行われたグラップル付きバックホウの集材作業費（KIM and PARK, 2013）14549 won/m³ と比べて、同じ条件下の本研究の $Vh=80 \text{ m}^3/\text{ha}$ の場合の集材作業費 20967 won/m³～45104 won/m³ は高費用の結果であった。タワーヤードの機械購入価格が 1 億 5 千万ウォンであり、グラップル付きバックホウの機械購入価格の 6000 万ウォンよりも 2.5 倍高く、作業員数もグラップル付きバックホウの 1 人に対して 3 人多いため人件費の占める割合も高くなり、グラップル付きバックホウによる集材よりも集材作業費が高くなった。しかし、グラップル付きバックホウによる集材は短幹集材、下げ荷集材に限られ、全幹・全木集材と上げ荷集材はできないことや、間伐地域や急傾斜地においては集材作業が不可能である。

したがって、タワーヤードとグラップル付きバックホウについては、作業現場に適切な作業システムを選択する必要がある。

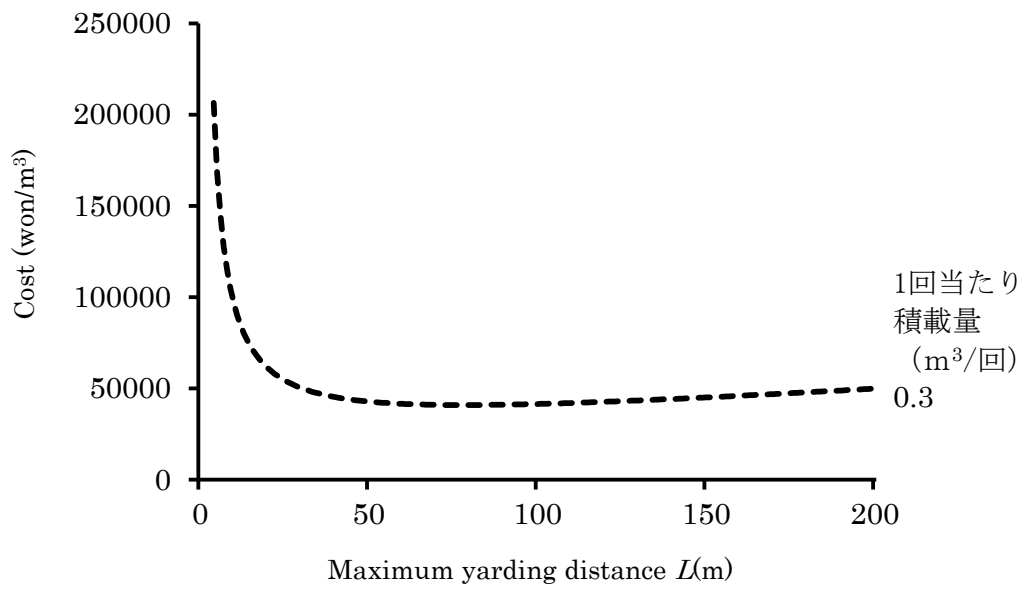


図-3.5 集材作業費と架設・撤去費の合計

Fig.3.5. The sum of yarding cost and rigging and dismantling cost

3.4 小括

韓国で行われているタワーヤーダの皆伐における集材作業システムを調査・分析した結果、 $Vh=80 \text{ m}^3/\text{ha}$ の場合、集材作業費 (won/m^3) と架設・撤去費 (won/m^3) の合計が最小になる集材距離は 78m であり、そのときの費用は $40948 \text{ won}/\text{m}^3$ であった。

同じ調査地で行われたグラップル付きバックホウの集材作業費 (KIM and PARK, 2013) $14549 \text{ won}/\text{m}^3$ と比べると、本研究の $Vh=80 \text{ m}^3/\text{ha}$ の場合は集材作業費が $20967 \text{ won}/\text{m}^3 \sim 45104 \text{ won}/\text{m}^3$ になり、グラップル付きバックホウの集材作業費より高費用の結果であった。タワーヤーダの機械購入価格が 1 億 5 千万ウォンであり、グラップル付きバックホウの機械購入価格の 6000 万ウォンよりも 2.5 倍高く、作業員数もグラップル付きバックホウの 1 人に対してタワーヤーダを 3 人としたため人件費も高くなり、グラップル付きバックホウによる集材よりも集材作業費が高くなった。しかし、グラップル付きバックホウによる集材は短幹集材、下げ荷集材に限られ、全幹・全木集材と上げ荷集材はできないことや、間伐地域と急傾斜地においては集材作業が不可能である。したがって、作業現場に適切な作業システムを選択する必要がある。

第 4 章 異なる 2 機種タワーヤーダによる集材作業の生産性、費用と最適路網密度

4.1 概説

本章は、2011 年に林野庁の先進林業機械の導入・改良事業で日本に導入されたオーストリア製のタワーヤーダ WANDERFALKE U-AM-2to と 2012 年に発売された日本製のタワーヤーダ NR301 による集材作業について、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。

4.2 調査地と方法

4.2.1 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) と日本 IHI 建機社製 NR301 (以下 NR と略記) である。両機種の諸元を表-4.1 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-4.1)。WF の索張り方式を図-4.2 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-4.3)。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-4.4 に示す。

表-4.1 供試タワーヤード WF と NR の諸元

Table 4.1. Specifications of the investigated tower yarders WF and NR

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-4.1 タワーヤーダ WANDERFALKE U-AM-2to

Fig.4.1. WANDERFALKE U-AM-2to of tower yarder

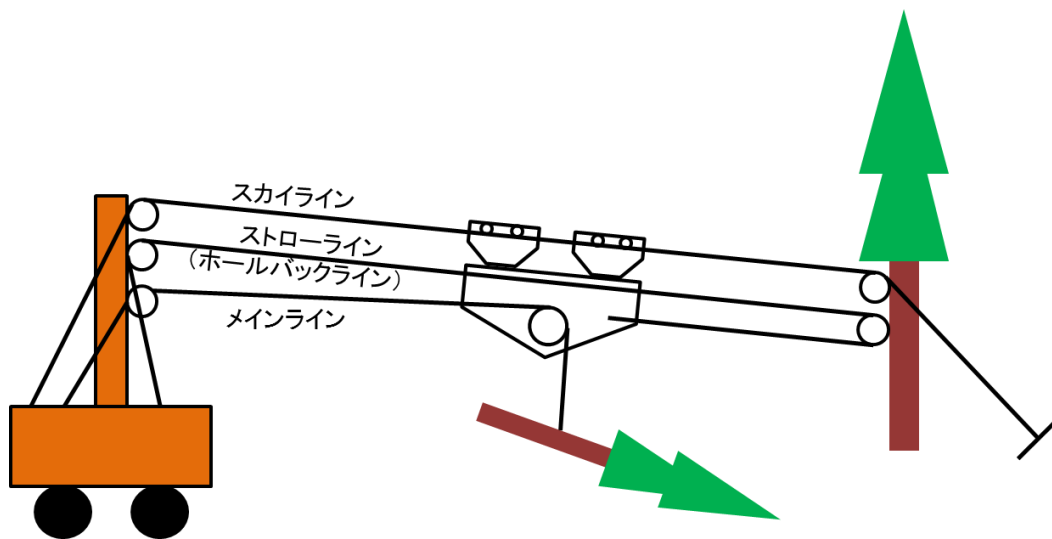


図-4.2 WANDERFALKE U-AM-2to の索張り方式（上げ荷集材）

Fig.4.2. 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 by the manufacturer. In the case of downhill yarding, main line turns back at the tail tree.



図-4.3 タワーヤーダ NR301

Fig.4.3. NR301 of tower yarder

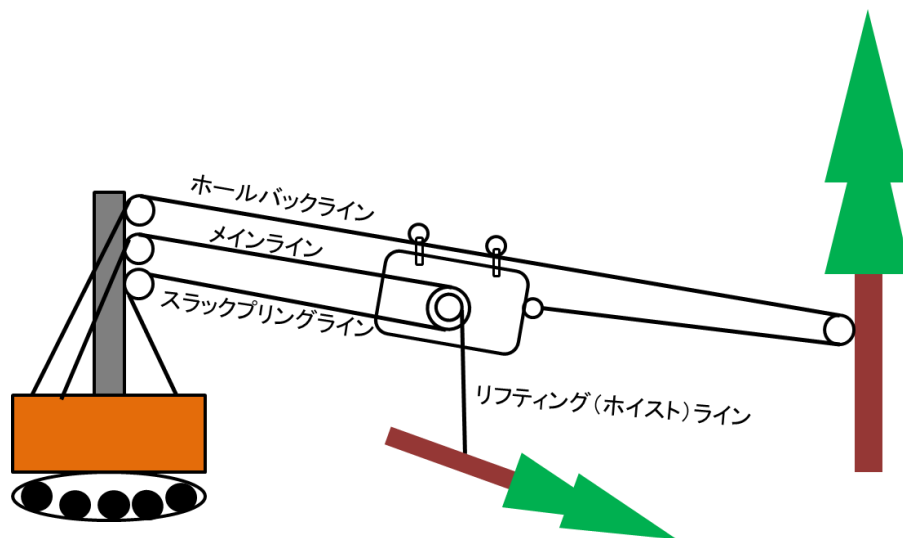


図-4.4 NR301 の索張り方式

Fig.4.4. Cable system of NR301

索の名称はメーカーによる。

Each cable is named by the manufacturer.

調査は WF については 2012 年 4 月 9 日～10 日に高知県香美市香北町で（以下，調査地 A），NR については 2014 年 2 月 5 日～7 日に島根県浜田市金城町で行った（以下，調査地 B）（表－4.2）。

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（図－4.5）。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，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（図－4.6）。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別して，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，グラップルソーの操作はタワーヤード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，いずれも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。

表-4.2 調査地の概要

Table 4.2. Description of investigated 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 ³ /本)	0.498	0.151
ha当り材積 (m ³)	622.5	290.5
ha当り立木本数 (本)	1250	1924
本数伐採率 (%)	32.5	95 以上



図-4.5 調査地 A

Fig.4.5. Investigated area A



図-4.6 調査地 B

Fig.4.6. Investigated area B

4.2.2 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。

4.2.3 分析方法

本章では作業時間観測に基づいて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(図-4.7)、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、 Vh 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 として植栽間隔から Ls を 11 m と設定した。なお、図-4.7 において道に対して両側集材を行うものとする。また、集材作業費に関わる数値を表-4.3 に示す。

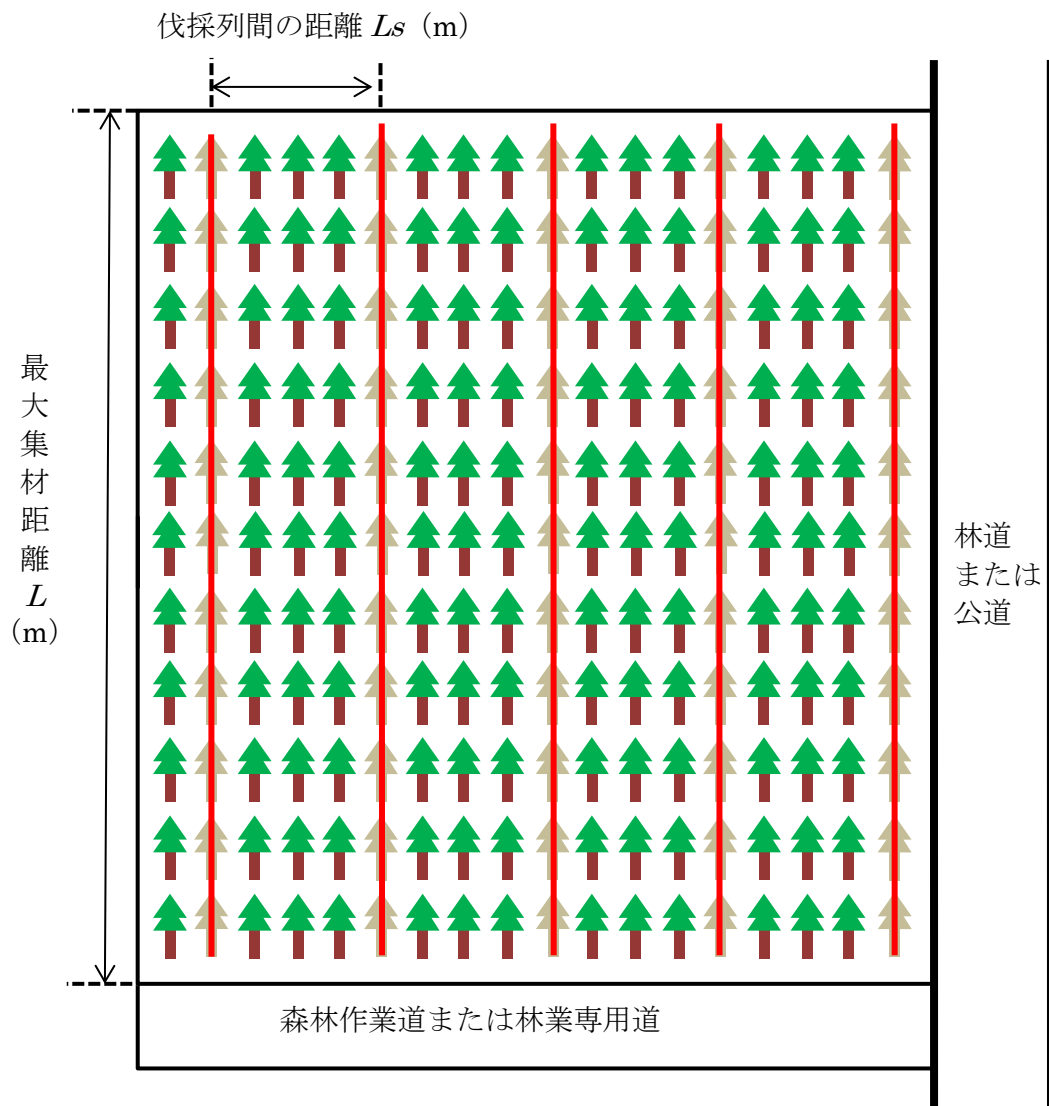


図-4.7 列状間伐モデル伐区

Fig.4.7. Line-thinning setting model

表-4.3 集材作業費の算出に使用した値

Table 4.3. Values used for calculation of yarding cost

		WF	NR
機械購入価格 (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
年間稼働時間 (時/年)	Xn	900	900
償却費率	γ	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	ε_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
燃料量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	ω	0.21	0.21
調査地の平均生産性 (m ³ /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。

4.3 結果と考察

4.3.1 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 m³ の集材作業を観測した。1 回当たりの平均集材材積は 0.42 m³/回、平均集材時間は 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 m³ の集材作業を観測した。1 回当たりの平均集材材積 0.46 m³/回、平均集材時間は 381.33 秒/回であり（表-4.4）、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-4.5）。

両調査地とも搬器走行速度は、空車、実車とも設計された走行速度（表-4.1）の半分以下であった。この理由として、表-4.1 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-4.5 の観測値を (2.1) 式に代入すると、WF および NR の平均サイクルタイム $Cy_A(L)$ および $Cy_B(L)$ （秒/回）はそれぞれ (4.1)、(4.2) 式となり、図-4.8 のようになる。なお、 L は、後述するように実用的に 200 m までとする。

$$Cy_A(L) = L\left(\frac{1}{2.37} + \frac{1}{1.28}\right)/2 + 252.28 \quad (4.1)$$

$$Cy_B(L) = L\left(\frac{1}{0.85} + \frac{1}{0.48}\right)/2 + 278.38 \quad (4.2)$$

ここで、1 回当たり積載量を、列状間伐の場合は今回の対象作業での値に近い 0.4 m³/回、小面積皆伐を想定した場合は 0.8 m³/回とする。(2.2) 式より 1 日の実働時間を 6 時間としたときの生産性 (m³/日) をそれぞれ計算した結果、図-4.9 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-4.5 のとおりとした。最大集材距離が長くなるほど生産性は下がるが、WF と NR を比較すると、最大集材距離が長くなるほど WF の方が生産性が高く、また 1 回当たり積載量が大きくな

るほど両者の差は大きくなった。図-4.9 の平均 1 回当たり積載量 0.4 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-4.4 の実際の生産性に近いことが確認できる。

表-4.4 集材作業の観測結果 (1)

Table 4.4. 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^3)	14.94	38.01
	集材時間 (秒)	10762	31269
	作業員数 (人)	3	3
1 回当たりの平均	集材材積 ($\text{m}^3/\text{回}$)	0.42	0.46
	集材時間 (秒/回)	298.94	381.33
1 時間当たりの平均	集材回数 (回/時)	12.04	9.44
	集材材積 ($\text{m}^3/\text{時}$)	5.00	4.36
1 日当たりの平均	集材回数 (回/日)	72.25	56.64
	集材材積 ($\text{m}^3/\text{日}$)	29.99	26.18
1 人・1 日当たりの平均	集材材積 ($\text{m}^3/\text{人} \cdot \text{日}$)	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。

表-4.5 集材作業の観測結果 (2)

Table 4.5. 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
作業員の先柱までの行きの移動歩行速度 (m/秒)	v_3	0.3	0.3
作業員の元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。

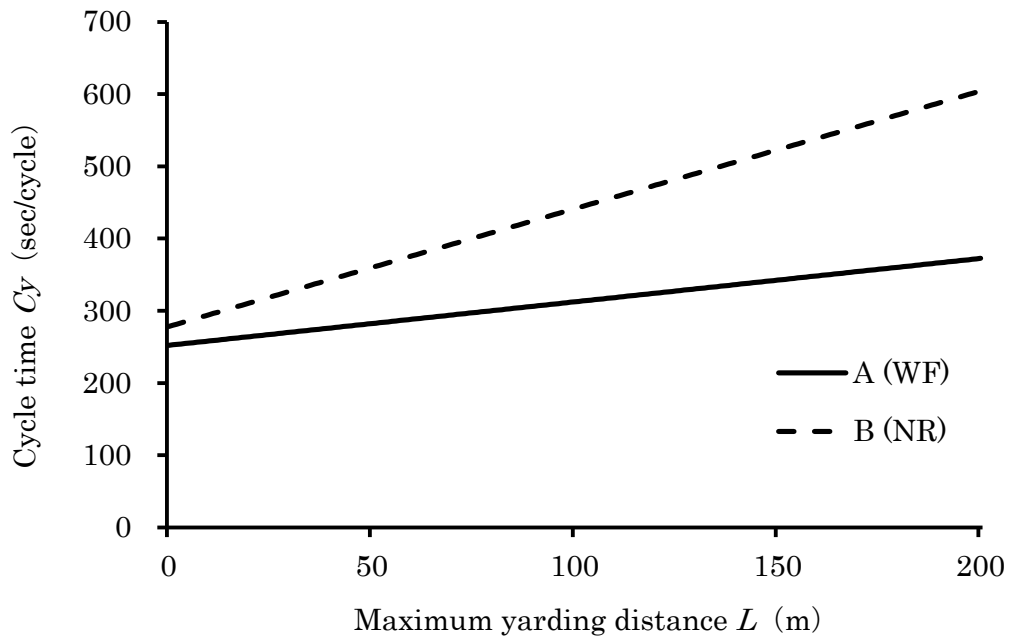


図-4.8 最大集材距離とサイクルタイムの関係

Fig.4.8. Relationships between maximum yarding distance and cycle time

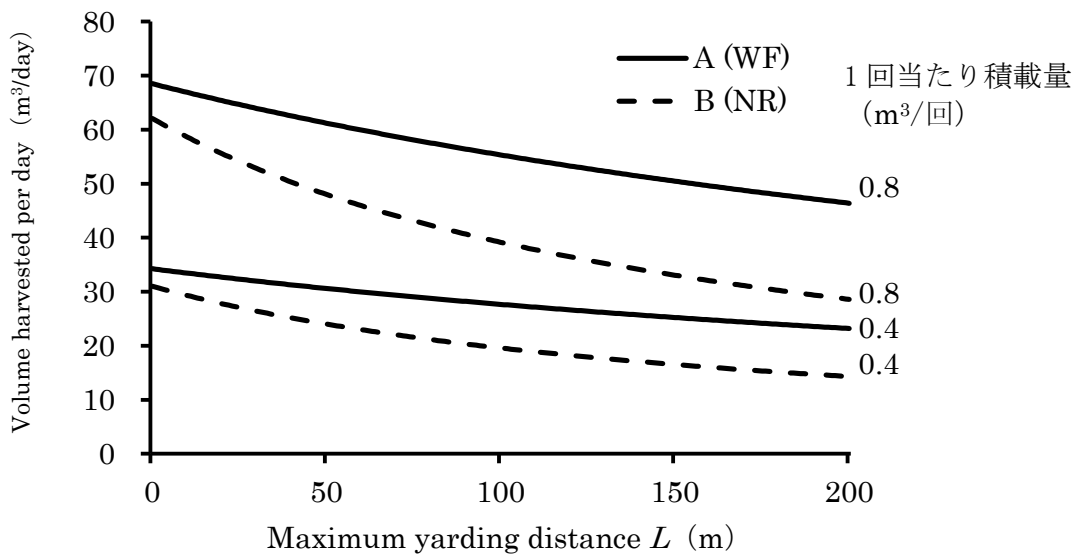


図-4.9 最大集材距離と生産性関係

Fig.4.9. Relationships between maximum yarding distance and productivity

4.3.2 作業費

架設・撤去作業時間の観測値（表-4.5）を（2.9）式に代入し、図-4.7 の伐区モデルにおける列状間伐を想定し、 $Vh=165 \text{ m}^3/\text{ha}$ とすると、最大集材距離 L (m) に対して、WF の架設・撤去費 $Csd(\text{WF})(L)$ (円/ m^3) と NR の架設・撤去費 $Csd(\text{NR})(L)$ (円/ m^3) はそれぞれ

$$Csd(\text{WF})(L) = 275482.09/L + 204.06 \quad (4.3)$$

$$Csd(\text{NR})(L) = 115304.56/L + 204.06 \quad (4.4)$$

となる。

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。

$$Csd(\text{WF})(L) = 68870.52/L + 51.02 \quad (4.5)$$

$$Csd(\text{NR})(L) = 28826.14/L + 51.02 \quad (4.6)$$

最大集材距離 L (m) に対して、図-4.9 の生産性に基づく集材作業費 (円/ m^3) と架設・撤去費 (円/ m^3) の合計は図-4.10 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ため生産性は高いものの（図-4.9）、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。これにより、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 1 回当たり積載量が大きくなるほど小さな値となった。また、平均 1 回当たり積載量が大きくなると、WF と NR の差は小さくなった。

4.3.3 路網費

次に、路網整備が不十分な林分を想定し、図-4.7 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ダで順次、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、路網開設延長は図-4.5より L_s (m)となり、単位材積当りの路網開設費 $P_{FRC}(L)$ (円/m³)は次式となる。

$$P_{FRC}(L) = \frac{10000 \cdot r \cdot L_s}{Vh \cdot L_s \cdot 2L} \quad (4.7)$$

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3 mで林地傾斜30°のときの開設費1500円/mの簡易な森林作業道 (SONら, 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 m³/ha、小面積皆伐660 m³/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-4.11になる。図-4.11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-4.11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。

$$d = 5000 \times (1 + \eta) / L \quad (4.8)$$

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

1回当たり積載量を0.4 m³/回 (列状間伐)、0.8 m³/回 (皆伐)に設定し、タワーヤーダの架設・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-4.12、図-4.13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-4.10と同じである。路網費用を含めると、1回当たり積載量が調査地の値に近い0.4 m³/回では、路網費用が1500円/mの場合、最大集材距離が200 m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94 m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に、図-4.10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。1回当たり積載量が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、1回当たり積載量0.4 m³/回のとくに比べて、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。

路網費用を25000円/mとしたときは、1回当たり積載量が調査地の値に近い0.4 m³/回では、最大集材距離が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。1回当たり積載量が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3669円/m³、最大集材距離が154 mのときのNRの最小合計費用が4445円/m³となり、1回当たり積載量0.4 m³/回のとくに比べて、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。

図-4.12をみると、最大集材距離が70~200 mでは、集材費と路網開設費の合計はほとんど変わらない。したがって実際には、現場の状況に応じて柔軟に路網計画を行ってもよいということが言える。

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-4.10 に示すものとなる。したがって、1 回当たり積載量が $0.4 \text{ m}^3/\text{回}$ の場合には最大集材距離が 123 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 1 回当たり積載量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 1 回当たり積載量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見られなかったが、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（今富，1994）。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、普及台数の増加に伴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、将来的にはライセンス生産などすることができれば望ましい。

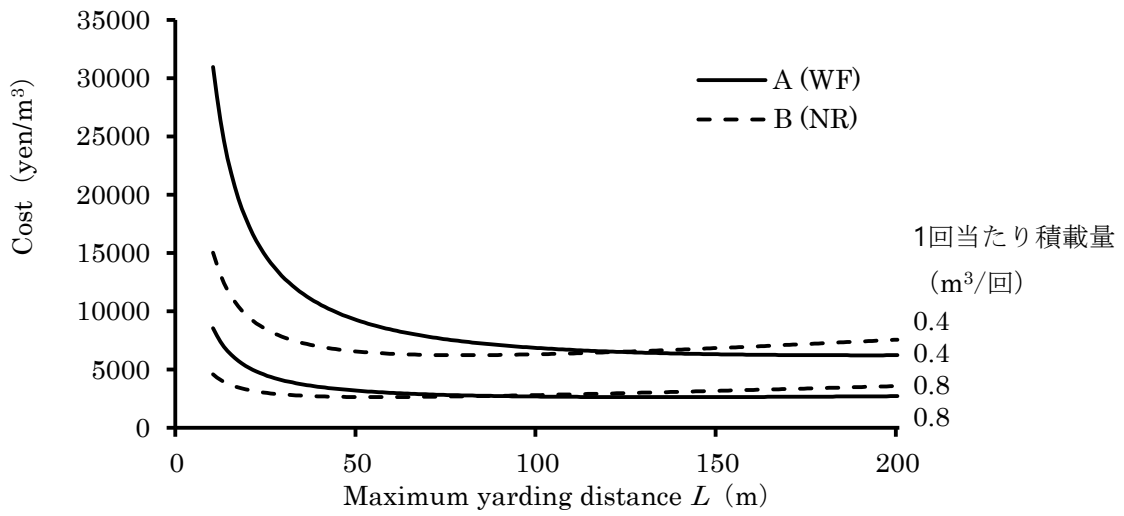


図-4.10 集材作業費と架設・撤去費の合計

Fig.4.10. The sum of yarding cost and rigging and dismantling cost

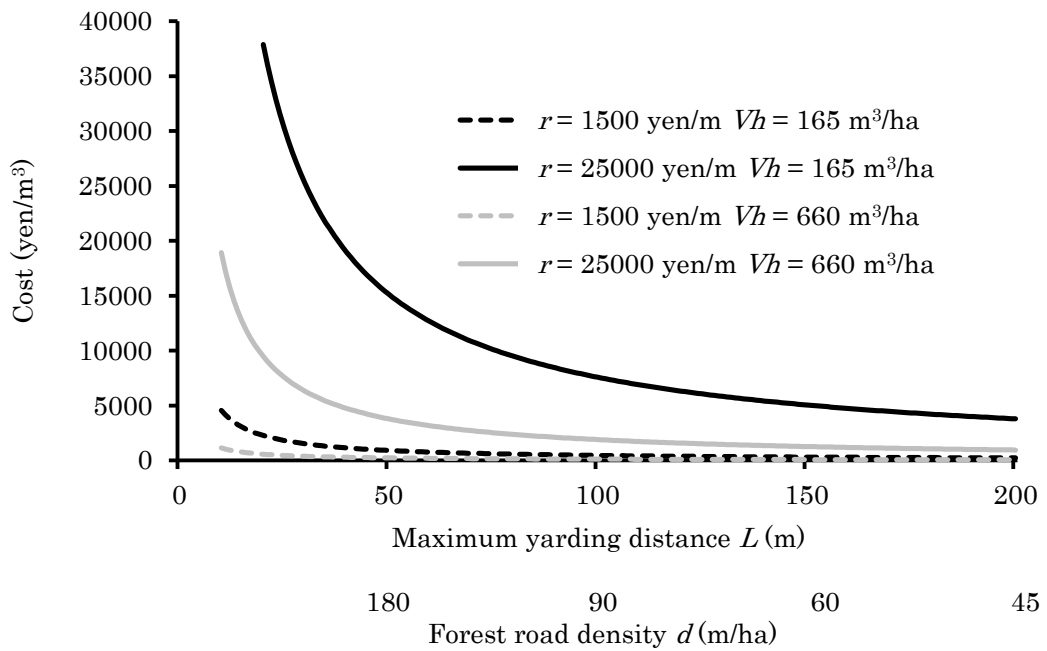


図-4.11 最大集材距離と単位材積当りの路網開設費

Fig.4.11. Relationships between maximum yarding distance and forest road network construction cost (yen/m³)

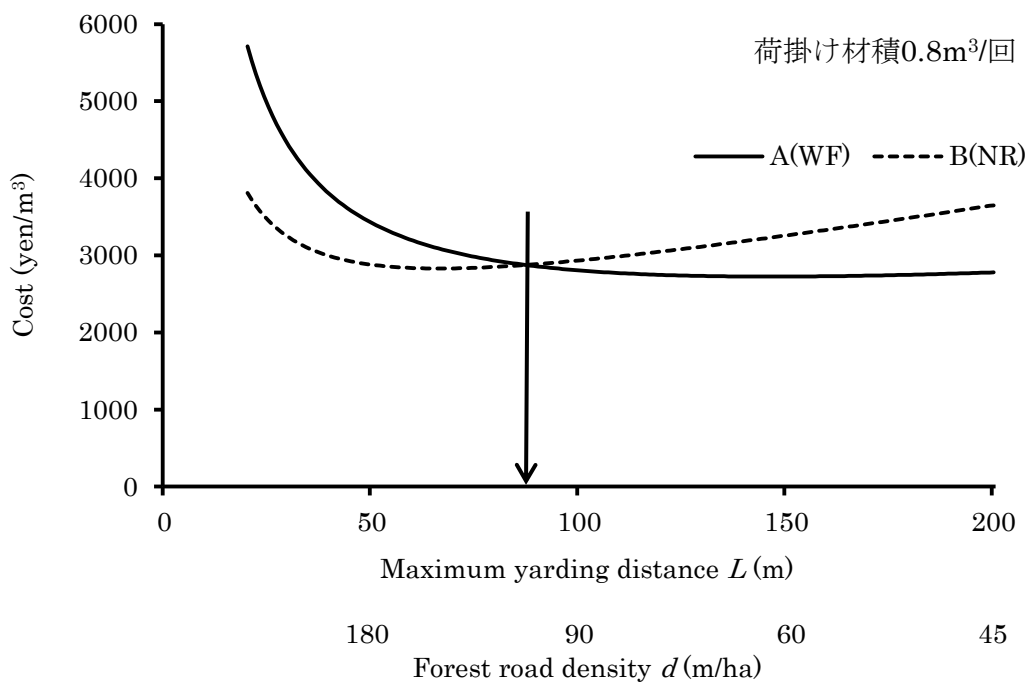
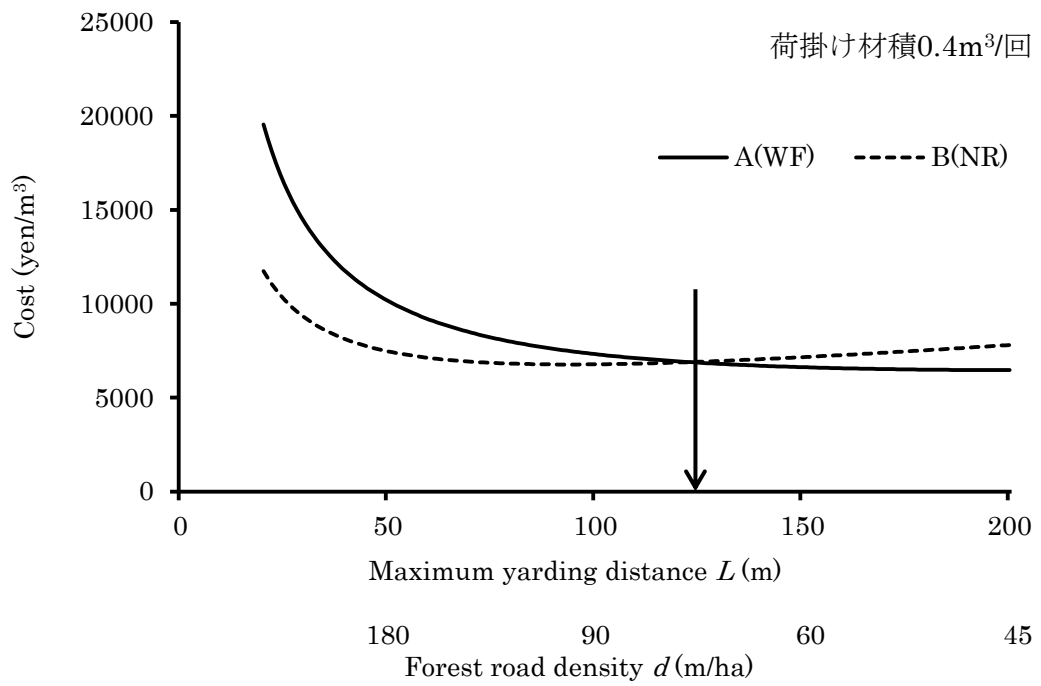


図-4.12 集材費用と路網開設費の合計 (1)

Fig.4.12. 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

In the case of 1500 yen/m for forest road construction cost

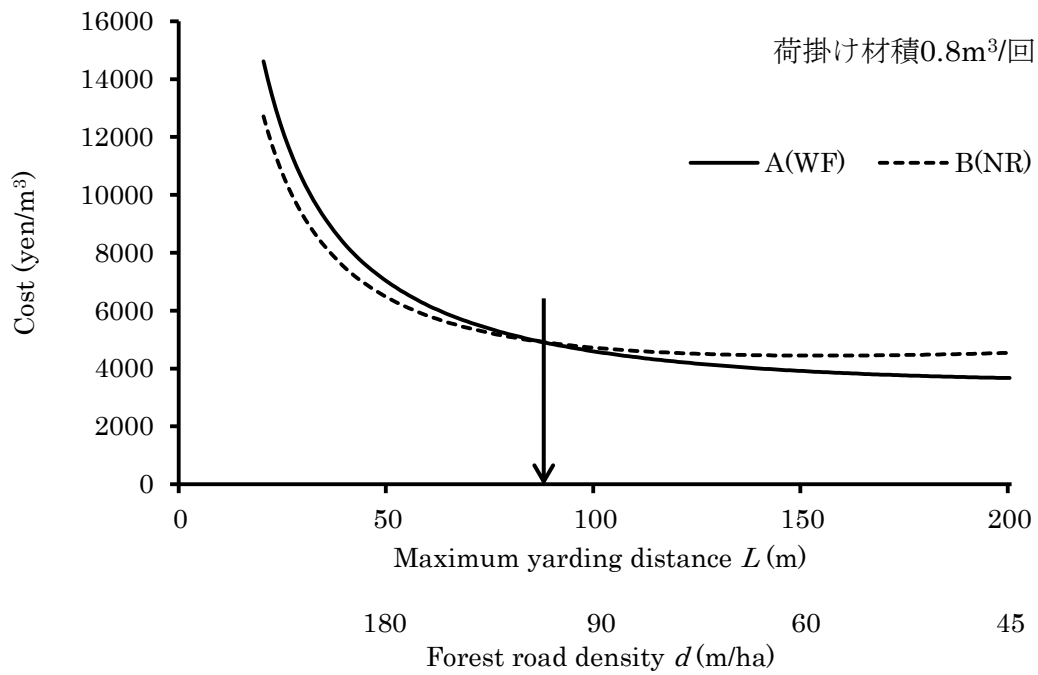
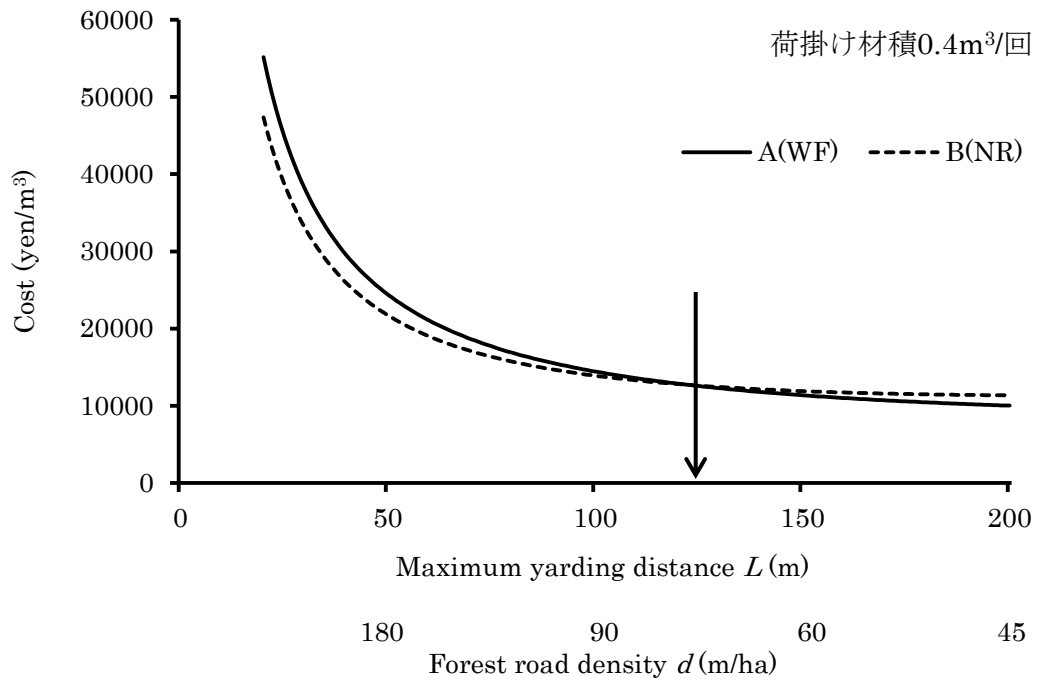


図-4.13 集材費用と路網開設費の合計 (2)

Fig.4.13. 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

In the case of 25000 yen/m for forest road construction cost

4.4 小括

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ため、最大集材距離が長くなるほど WF の方が生産性が高く、また 1 回当たり積載量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 m 以下の列状間伐と最大集材距離が 88 m 以下の皆伐では NR が有利となった。集材距離が短く、1 回当たり積載量が小さいときに、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、路網開設費用を 1 回の事業で負担するものとする路網費用を含めた合計費用は 6500 円/m³ 前後になってしまうが、1 回当たり積載量が 0.8 m³/回の皆伐ならば、3000 円/m³ 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 円/m³~4445 円/m³ となった。

なお、最大集材距離が 70~200 m、路網密度にして約 100 m/ha 以下では、集材費と路網開設費の合計はほとんど変わらないので、実際には現場の状況に応じて柔軟な路網計画あるいは作業計画を立ててもよい。

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、1 回当たり積載量を大きくするのが有用である。

第 5 章 韓国におけるタワーヤーダによる集材作業と最適路網密度の検討

5.1 概説

本章は、前章で考察したオーストリア製のタワーヤーダ WANDERFALKE U-AM-2to と日本製のタワーヤーダ NR301 を韓国に導入することを想定し、3 章で検討した韓国で行われている既存のタワーヤーダ RME-300T と、生産性・作業費を比較し、路網整備について考察を行うことにする。

5.2 方法

5.2.1 対象機種と集材作業地

対象とするタワーヤーダは、日本の及川自動車（株）社製 RME-300T（以下 RME と略記）とオーストリアの MAYR-MELNHOF FORSTTECHNIK 社製 WANDERFALKE U-AM-2to（以下 WF と略記）、日本の IHI 建機社製 NR301（以下 NR と略記）とする。機種種の諸元は表-3.1 と表-4.1 のとおりである。

作業地として、韓国の主要造林樹種であり、人工林面積の 39.8%を占めているカラマツ人工林と 28.5%を占めているリギダマツ人工林を想定した（山林庁, 2015b）。

5.2.2 分析方法

本章では、林分条件は韓国の 40 年生リギダマツ林と 30 年生カラマツ林を想定して ha 当たり材積をそれぞれ 240 m³/ha, 200 m³/ha とし（山林庁・国立山林科学院, 2012）、3 残 1 伐の列状間伐（伐採率 25 %）を想定することで、RME, WF, NR の三者を同じ作業条件下で比較を行うこととし、 V_h をリギダマツ林は 60 m³/ha（240 m³/ha の 25%）、カラマツ林は 50 m³/ha（200 m³/ha の 25%）、ha 当たり立木本数をリギダマツ林は 878 本/ha, カラマツ林は 706 本/ha とし L_s をリギダマツ林は 13 m, カラマツ林は 15m と設定した。図-4.7 の伐区モデルにおいて道に対して両側集

材を行うものとする。

5.3 結果と考察

5.3.1 生産性

表-3.5 と表-4.5 の数値を (2.1) 式に代入すると、RME, WF, NR の平均サイクルタイム $C_{yRME}(L)$, $C_{yWF}(L)$, $C_{yNR}(L)$ (秒/回) はそれぞれ (5.1), (5.2), (5.3) 式となり、図-5.1 のようになる。

$$C_{yRME}(L) = L\left(\frac{1}{0.86} + \frac{1}{0.76}\right)/2 + 215.56 \quad (5.1)$$

$$C_{yWF}(L) = L\left(\frac{1}{2.37} + \frac{1}{1.28}\right)/2 + 252.28 \quad (5.2)$$

$$C_{yNR}(L) = L\left(\frac{1}{0.85} + \frac{1}{0.48}\right)/2 + 278.38 \quad (5.3)$$

ここで、1 サイクル当りの平均 1 回当たり積載量を、列状間伐の場合は $0.3 \text{ m}^3/\text{回}$ 、小面積皆伐を想定した場合は $0.6 \text{ m}^3/\text{回}$ とする。(2.2) 式より 1 日の実働時間を 6 時間としたときの生産性 ($\text{m}^3/\text{日}$) を計算した結果、図-5.2 のようになった。ただし、荷掛けなどの時間 T_{LV} (秒/回) は観測結果より表-2.5 と表-3.5 のとおりとした。

最大集材距離が長くなるほど生産性は下がるが、0~57m においては RME の生産性が高く、58m 以上になると WF の生産性が高くなった。また WF と NR を比較すると、最大集材距離が長くなるほど WF の方が生産性が高く、また 1 回当たり積載量が大きくなるほど両者の差は大きくなり、第 4 章と同様の結果となった。

表-5.1 集材作業費の算出に使用した値
Table 5.1. Values used for calculation of yarding cost

		RME	WF	NR
機械購入価格 (won)	I	150000000	308550000	252450000
耐用時間 (時)	X	6300	6300	6300
耐用年数 (年)	n	7	7	7
1日運転時間 (時)	H	6	6	6
年間運転日数 (日/年)	D	150	150	150
年間稼働時間 (時/年)	Xn	900	900	900
償却費率	γ	0.9	0.9	0.9
保守・修理費率	$\varepsilon_A + \varepsilon_B$	0.2	0.2	0.2
年間機械管理費率	ε_C	0.07	0.07	0.07
調査地における燃料消費量 (ℓ/時)	Q	5	5	5
燃料単価 (won/ℓ)	Q_C	1230	1230	1230
燃料量に対する潤滑油等の油脂費率	q	0.38	0.38	0.38
年利率	i	0.07	0.07	0.07
資本利子係数	ω	0.21	0.21	0.21
調査地の平均生産性 (m ³ /日)	P	20.3	29.99	26.18
タワーヤードオペレータの労務費 (won/日)		130411	130411	130411
荷掛け手の労務費 (won/日)		89566	89566	89566
荷下し手の労務費 (won/日)		89566	89566	89566
償却費 (won/時)		21429	44079	36064
管理費 (won/時)		11667	23998	19635
資本利子 (won/時)		7116	14638	11976
保守・修理費 (won/時)		4762	9795	8014
燃料・油脂費 (won/時)		8487	8487	8487
タワーヤードオペレータの労務費 (won/時)		21735	21735	21735
荷掛け手の労務費 (won/時)		14928	14928	14928
荷下し手の労務費 (won/時)		14928	14928	14928

軽油単価は韓国石油公社 (<http://www.knoc.co.kr/>) の国内油価 (参照 2015 年 11 月 24 日) であり, 労務費は大韓建設協会の 2015 年下半期適用建設業賃金実態報告書のデータである。100 円=935 won (www.naver.com, 参照 2015 年 8 月 7 日)。

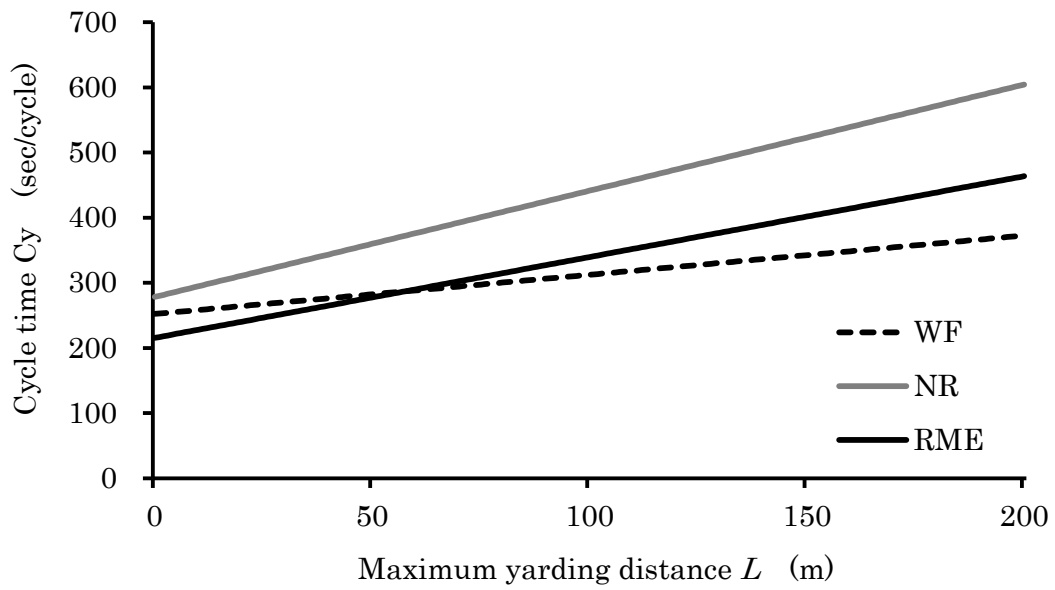


図-5.1 最大集材距離とサイクルタイムの関係

Fig.5.1. Relationships between maximum yarding distance and cycle time

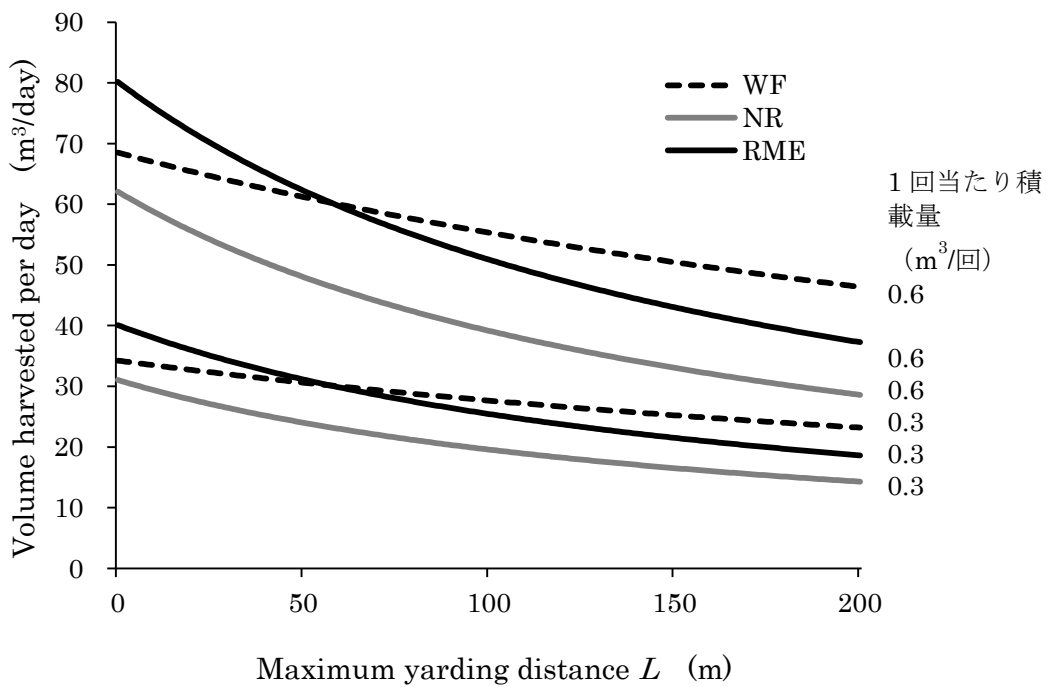


図-5.2 最大集材距離と生産性との関係

Fig.5.2. Relationships between maximum yarding distance and productivity

5.3.2 作業費

架設・撤去作業時間の観測値（表-2.5, 表-3.5）を（2.9）式に代入し，図-4.7の伐区モデルにおけるリギダマツ林の列状間伐を想定し， $Vh=60 \text{ m}^3/\text{ha}$ とすると，最大集材距離 L （m）に対して，RME の架設・撤去費 $Csd(\text{RME})(L)$ （won/ m^3 ），WF の架設・撤去費 $Csd(\text{WF})(L)$ （won/ m^3 ），NR の架設・撤去費 $Csd(\text{NR})(L)$ （won/ m^3 ）はそれぞれ

$$Csd(\text{RME})(L) = 1508285.16/L + 3158.55 \quad (5.4)$$

$$Csd(\text{WF})(L) = 4264038.46/L + 3158.55 \quad (5.5)$$

$$Csd(\text{NR})(L) = 1784736.99/L + 3158.55 \quad (5.6)$$

となる（ただし，作業員の先柱までの行き・元柱まで帰りの移動歩行速度（m/秒）は0.3とする）。

また，カラマツ林の列状間伐を想定し， $Vh=50 \text{ m}^3/\text{ha}$ とすると 以下のようになる。

$$Csd(\text{RME})(L) = 1568616.57/L + 3284.89 \quad (5.7)$$

$$Csd(\text{WF})(L) = 4434600/L + 3284.89 \quad (5.8)$$

$$Csd(\text{NR})(L) = 1856126.47/L + 3284.89 \quad (5.9)$$

次に，リギダマツ林の小面積皆伐の場合は， $Vh=240 \text{ m}^3/\text{ha}$ とすると以下のようになる。

$$Csd(\text{RME})(L) = 377071.29/L + 789.64 \quad (5.10)$$

$$Csd(\text{WF})(L) = 1066009.62/L + 789.64 \quad (5.11)$$

$$Csd(\text{NR})(L) = 446184.25/L + 789.64 \quad (5.12)$$

また，カラマツ林の小面積皆伐の場合は， $Vh=200 \text{ m}^3/\text{ha}$ とすると以下のようになる。

$$Csd(\text{RME})(L) = 392154.14/L + 821.22 \quad (5.13)$$

$$Csd(\text{WF})(L) = 1108650/L + 821.22 \quad (5.14)$$

$$Csd(NR)(L) = 464031.62/L + 821.22 \quad (5.15)$$

最大集材距離 L (m) に対して、図-5.2 の生産性に基づく集材作業費 (won/m³) と架設・撤去費 (won/m³) の合計は図-5.3 のようになる。皆伐は出材量が多いため、第 4 章の結果と同様、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 RME に比べて搬器走行速度が大きいため最大集材距離が 58m 以上の場合、生産性は高いものの (図-5.2) , WF と NR の機械価格が RME の機械価格より約 1.7~2 倍高く、特に WF は主索固定式 (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。これにより、RME が費用面で全体的に有利となった。

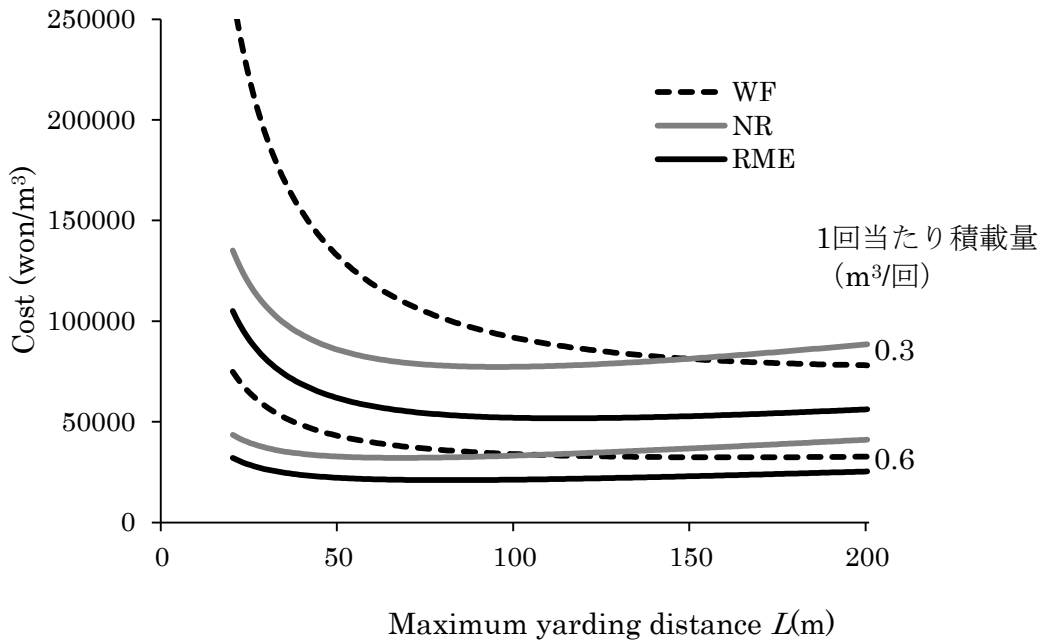
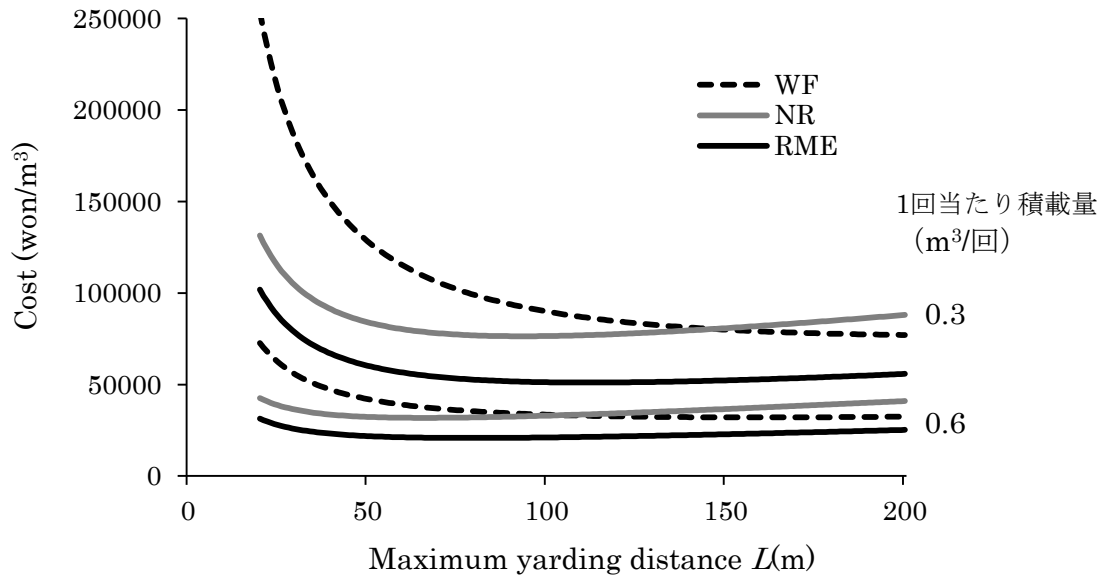


図-5.3 集材作業費と架設・撤去費の合計

Fig.5.3. The sum of yarding cost and rigging and dismantling cost

上：リギダマツ林，下：カラマツ林

5.3.3 路網費

次に、路網整備が不十分な林分を想定し、図-4.7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-4.7より L_s (m) となり、単位材積当りの路網開設費 $P_{FRC}(L)$ (won/m³) は(4.7)式となる。ここでは事業として開設費用の負担を重視して、 r (won/m) として、作業林道の開設単価である22000 won/m (国立山林科学院, 2008) と、幹線林道の開設単価である207000 won/m を想定する (山林庁, 2015a)。

単位面積当りの出材材積 Vh を前記のリギダマツ林とカラマツ林の列状間伐60 m³/ha と50 m³/ha, 小面積皆伐240 m³/ha と200 m³/ha を想定して、単位材積当りの路網開設費 $P_{FRC}(L)$ (won/m³) を求めると図-5.4になる。図-5.4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-5.4以下には、最大集材距離 L (m) に対して、路網密度 d (m/ha) を(4.8)式から求め (酒井, 1987), 密度の目安として併記した。

1回当たり積載量を0.3 m³/回 (列状間伐), 0.6 m³/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 (won/m³) と上記の単位材積当りの路網開設費 (won/m³) を合計した費用を図-5.5, 図-5.6, 図-5.7, 図-5.8に示す。

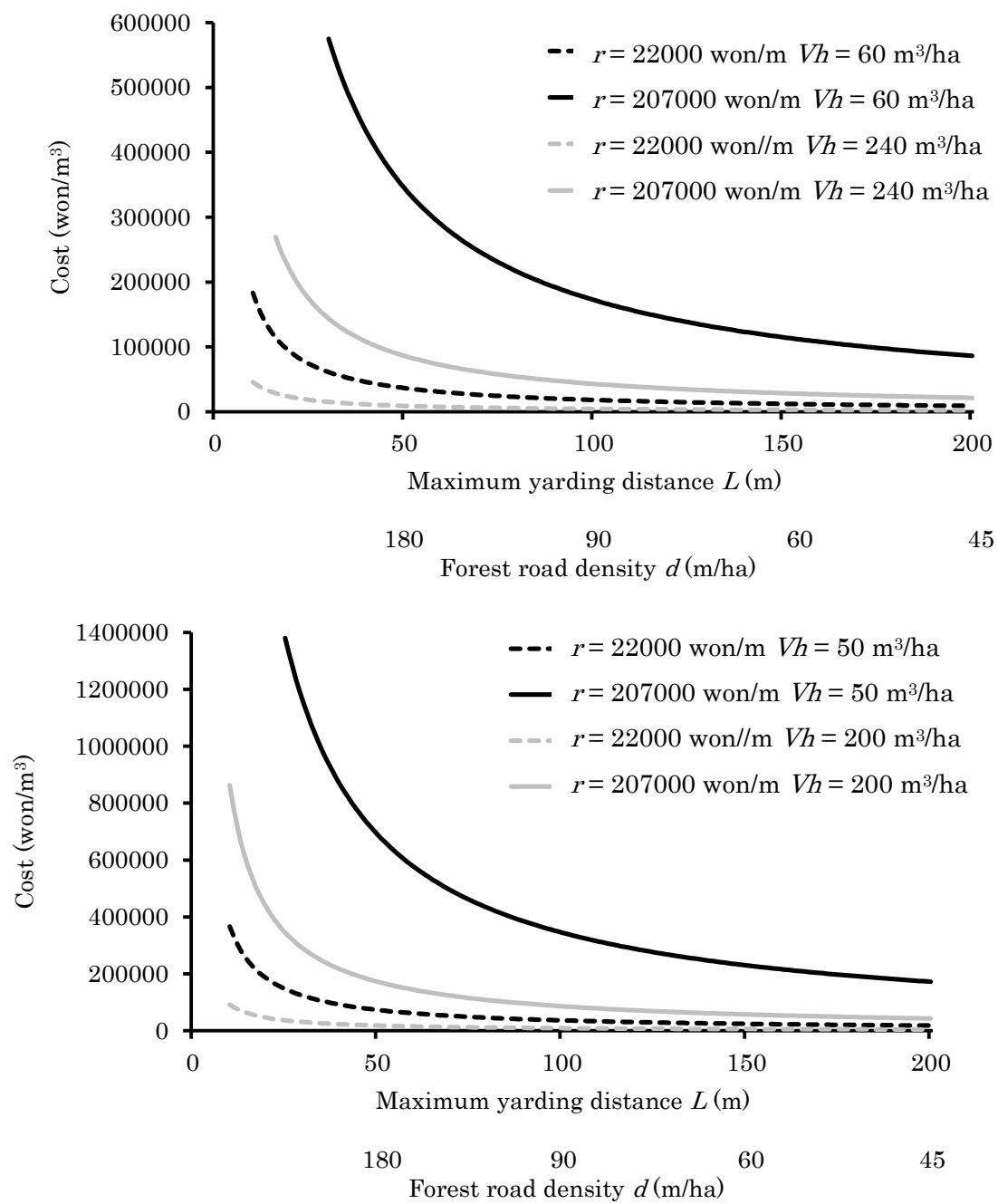


図-5.4 最大集材距離と単位材積当りの路網開設費

Fig.5.4. Relationships between maximum yarding distance and forest road network construction cost (won/m³)

上：リギダマツ林，下：カラマツ林

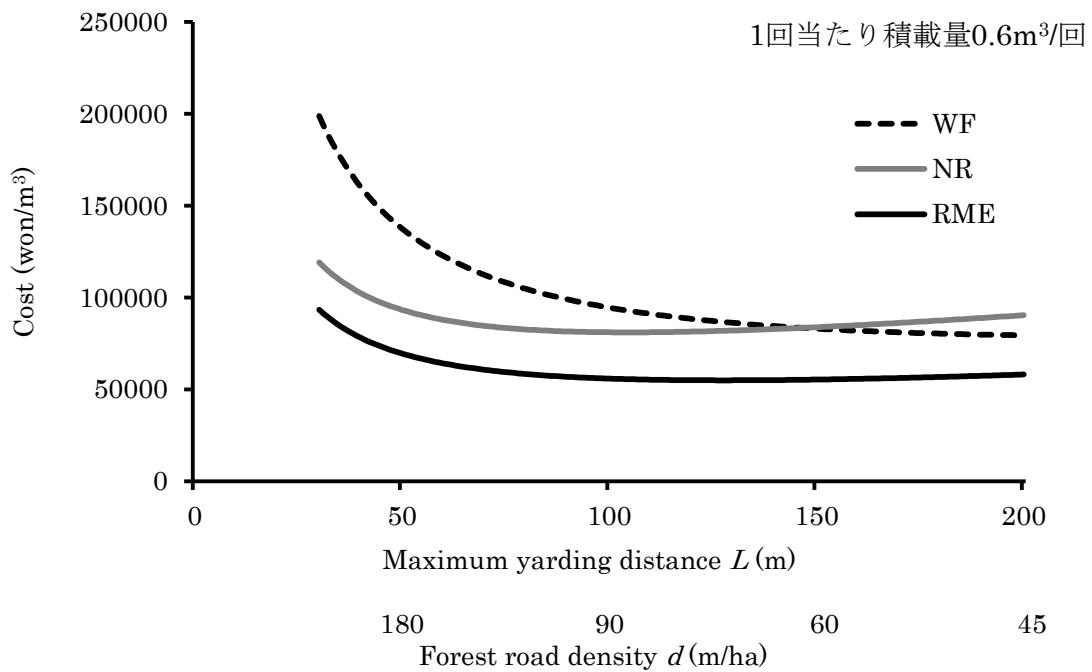
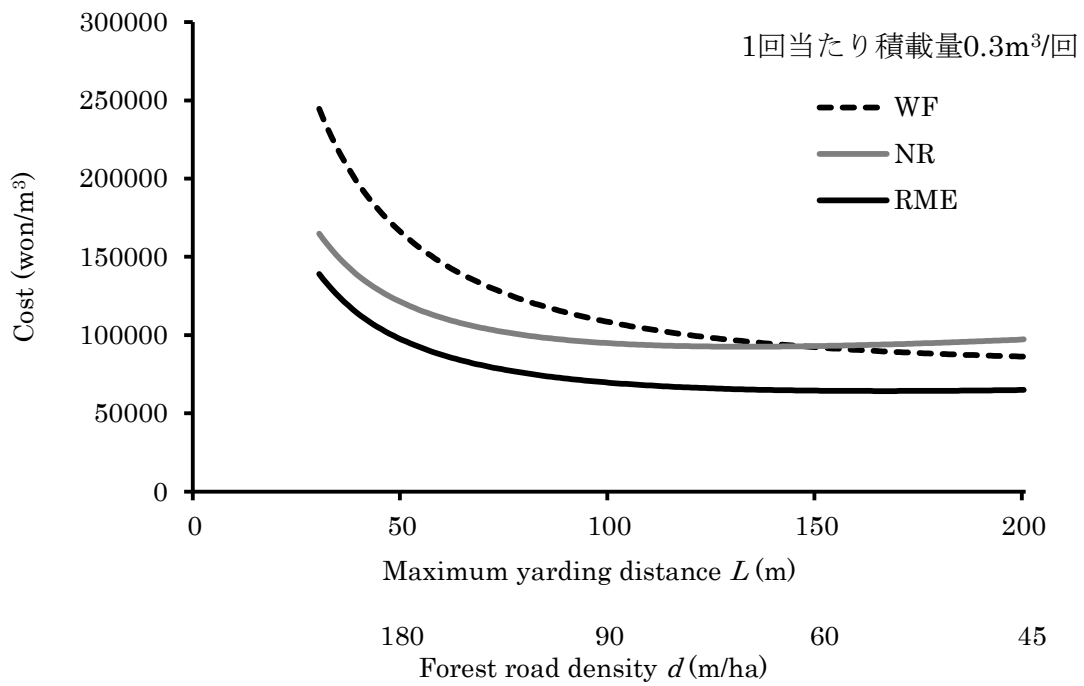


図-5.5 集材費と路網開設費の合計 (リギダマツ林)

Fig.5.5. The sum of yarding costs and forest road network construction cost (pitch pine forest)

作業林道開設単価 22000 won/m の場合

In the case of 22000 won/m for forest road construction cost

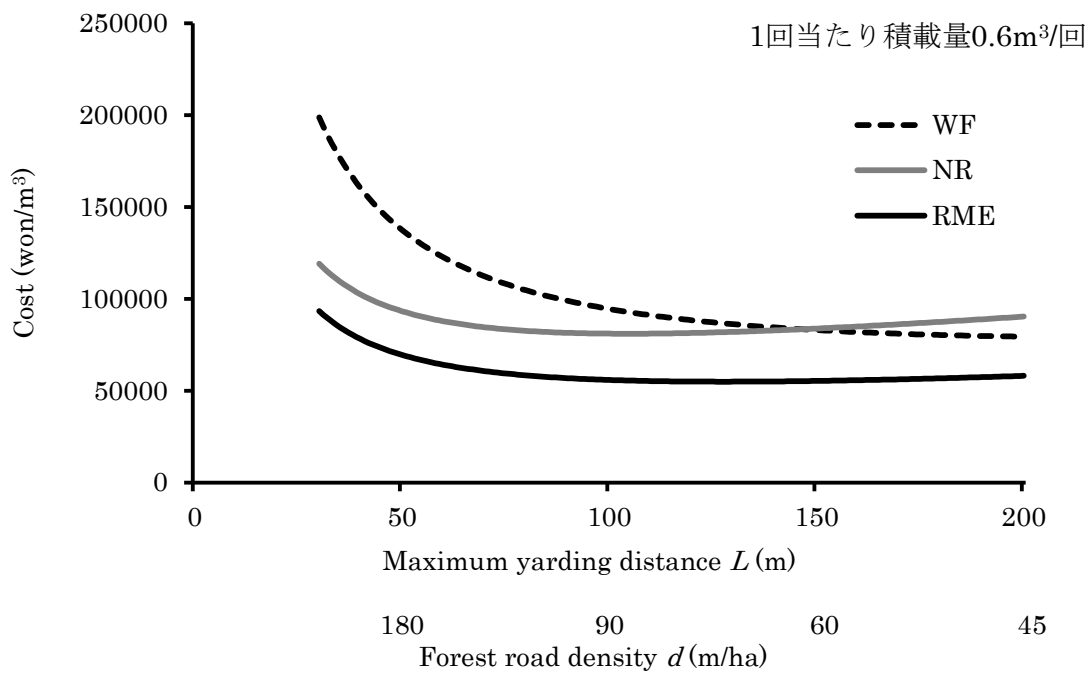
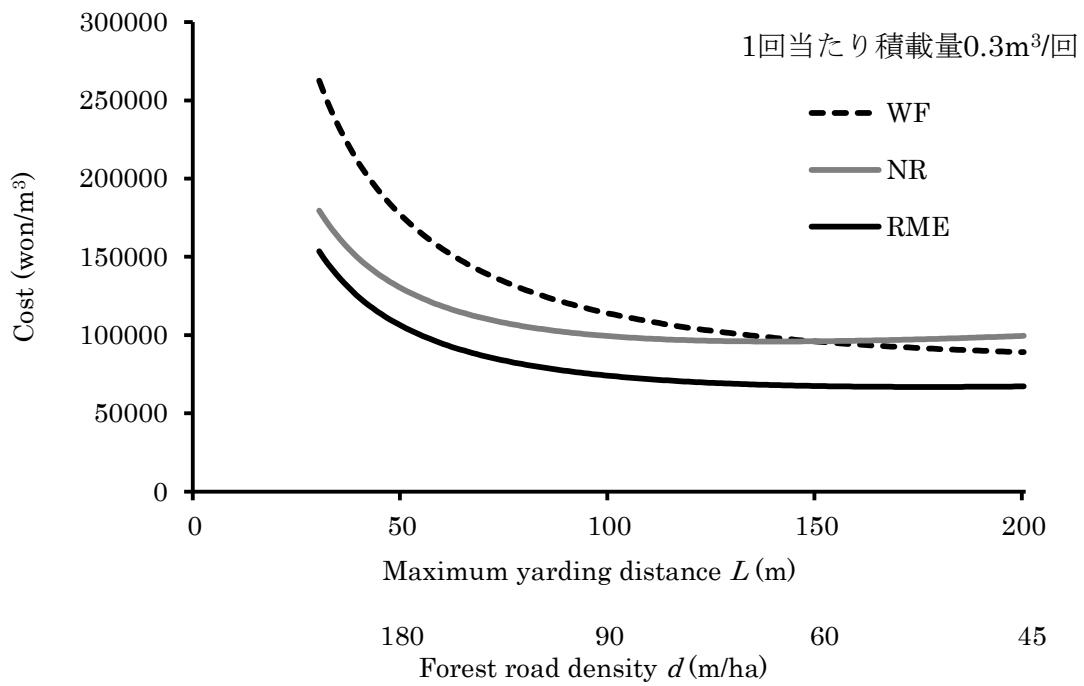


図-5.6 集材費と路網開設費の合計 (カラマツ林)

Fig.5.6. The sum of yarding costs and forest road network construction cost (larch forest)

作業林道開設単価 22000 won/m の場合

In the case of 22000 won/m for forest road construction cost

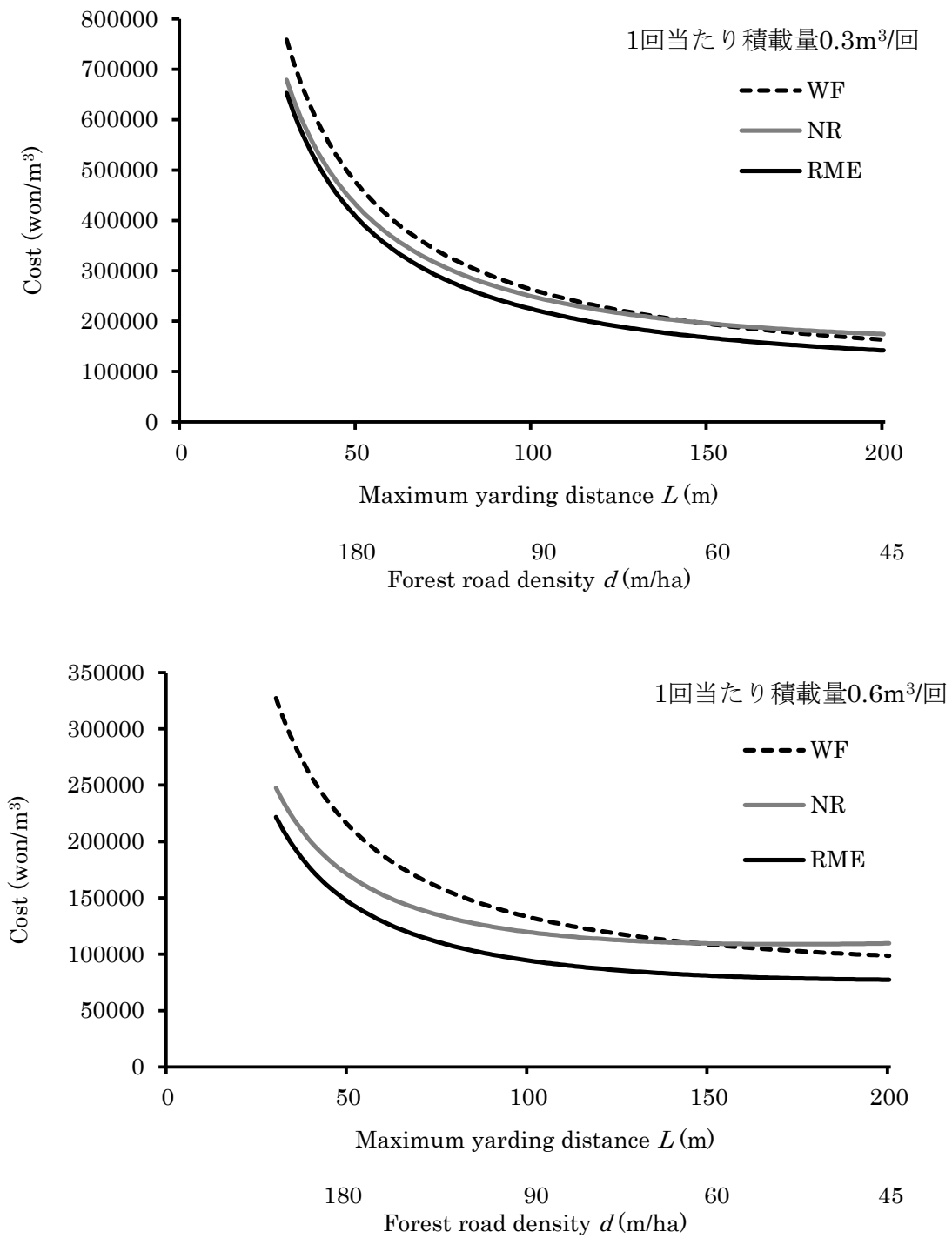


図-5.7 集材費と路網開設費の合計 (リギダマツ林)

Fig.5.7. The sum of yarding costs and forest road network construction cost (pitch pine forest)

幹線林道開設単価 207000 won/m の場合

In the case of 207000 won/m for forest road construction cost

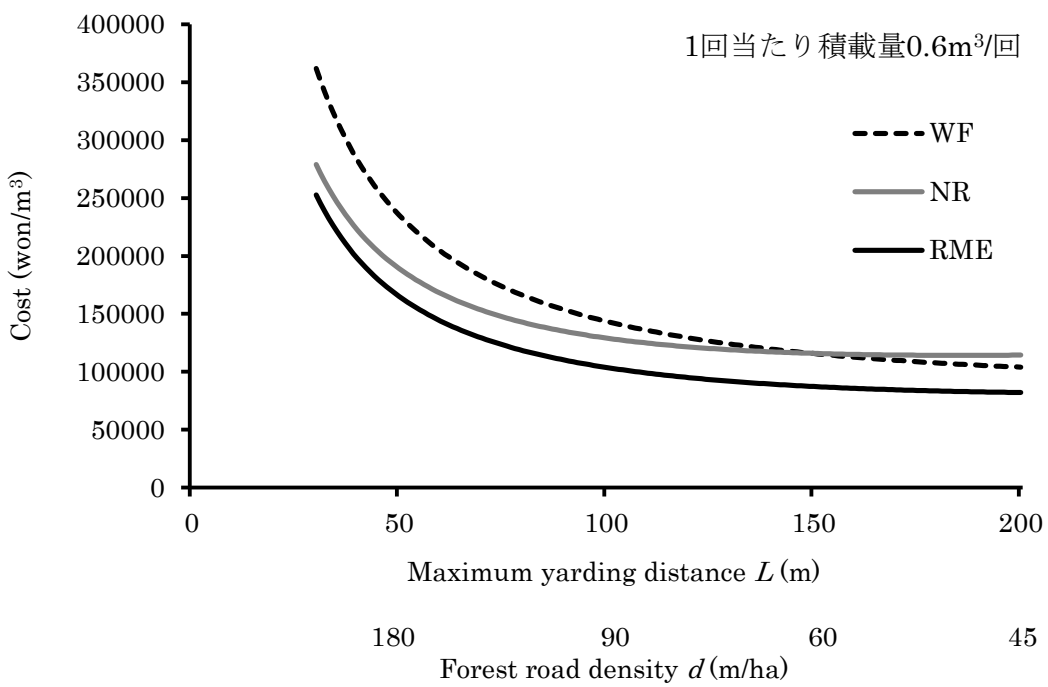
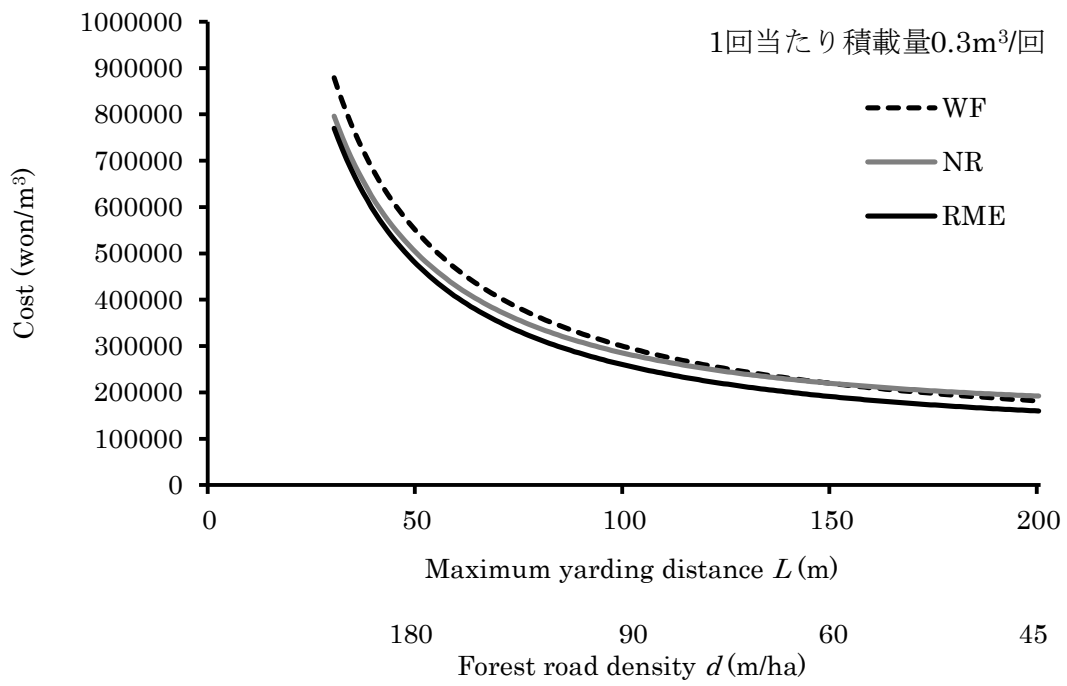


図-5.8 集材費と路網開設費の合計 (カラマツ林)

Fig.5.8. The sum of yarding costs and forest road network construction cost (larch forest)

幹線林道開設単価 207000 won/m の場合

In the case of 207000 won/m for forest road construction cost

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各機種の有利・不利は図-5.3と同じである。路網費用を含めると、1回当たり積載量が0.3 m³/回では、路網費用が22000 won/mで、リギダマツ林の場合、RME, WF, NRの最小合計費用はそれぞれ最大集材距離が166 mのとき64290 won/m³、最大集材距離が200 mのとき86280 won/m³、最大集材距離が133 mのとき92614 won/m³が得られた。カラマツ林の場合、RME, WF, NRの最小合計費用は最大集材距離が177 mのとき66905 won/m³、最大集材距離が200 mのとき89093 won/m³、最大集材距離が141 mのとき95943 won/m³が得られた。RMEが全体的に費用面では一番有利になり、リギダマツ林の場合は最大集材距離が147 m、カラマツ林の場合は最大集材距離が150mより短ければNRが、長ければWFがRMEの次に費用的に有利になる。

1回当たり積載量が0.6 m³/回になると、リギダマツ林の場合、RME, WF, NRの最小合計費用は最大集材距離が128 mのとき54938 won/m³、最大集材距離が200 mのとき79045 won/m³、最大集材距離が105 mのとき81035 won/m³が得られ、カラマツ林の場合、RME, WF, NRの最小合計費用は最大集材距離が132 mのとき56233 won/m³、最大集材距離が200 mのとき80843 won/m³、最大集材距離が108 mのとき82692 won/m³が得られ、1回当たり積載量0.3 m³/回のときに比べて、合計費用は約84~92%に低減した。RMEが全体的に費用面では一番有利になり、リギダマツ林の場合は最大集材距離が147 m、カラマツ林の場合は最大集材距離が150mより短ければNRが、長ければWFがRMEの次に費用的に有利になる。

路網費用を207000 won/mとしたときは、1回当たり積載量が0.3 m³/回では、最大集材距離が200 mのとき、リギダマツ林の場合、RMEの最小合計費用142054 won/m³、WFの最小合計費用163364 won/m³、NRの最小合計費用174315 won/m³が得られ、カラマツ林の場合、RMEの最小合計費用159732 won/m³、WFの最小合計費用181593 won/m³、NRの最小合計費用192048 won/m³が得られた。1回当たり

積載量が 0.6 m³/回になると、最大集材距離が 200 m のとき、リギダマツ林の場合、RME の最小合計費用 77367 won/m³、WF の最小合計費用 98676 won/m³、最大集材距離が 172 m のとき、NR の最小合計費用 108852 won/m³ となり、カラマツ林の場合、最大集材距離が 200 m のとき、RME の最小合計費用 82107 won/m³、WF の最小合計費用 103968 won/m³、最大集材距離が 185 m のとき、NR の最小合計費用 114199 won/m³ となり、1 回当たり積載量 0.3 m³/回のとくに比べて、合計費用は約 51~62% に低減した。

5.4 小括

最大集材距離が長くなるほど生産性は下がるが、0~57m においては RME の生産性が高く、58m 以上になると WF の生産性が高くなった。また WF と NR を比較すると、最大集材距離が長くなるほど WF の方が生産性が高く、また 1 回当たり積載量が大きくなるほど両者の差は大きくなった。

しかし、WF と NR の機械購入価格が RME の機械購入価格より約 1.7~2 倍高く、特に WF は主索固定式（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。これにより、RME が費用面で全体的に有利となった。

作業林道（韓国において一定区域の山林作業施行のための幹線林道・支線林道あるいは道路から連結し設置する林道、全体幅 3.5 m（有効幅 3 m，路肩 0.25 m））を前提とする列状間伐では、路網費用を含めた合計費用は 64000 won/m³~96000 won/m³ であるが、1 回当たり積載量が 0.6 m³/回の皆伐ならば、集材費 60000 won/m³ 以下が実現可能である。幹線林道（韓国において山林の経営・管理および保護上、中枢的役割をしている林道として、道路と道路の間を連結する林道、全体幅 5 m（有効幅 4 m，路肩 0.5 m））を開設しながらの集材作業になると、皆伐前提でも路網費用を含めた合計費用は 77000 won/m³~114000 won/m³ となった。

韓国のカラマツとリギダマツの材価は 141600 won/m³, 122400 won/m³であり（山林庁, 2015b）, 既往研究（KIM and PARK, 2013）の伐倒費 2099 won/m³, 造材費 18597 won/m³, 運材費（森林現場から 1.5 km 離れている中間土場まで）12701 won/m³の合計費用 33379 won/m³を勘案すると, 今回の結果から現状ではリギダマツ 40 年生林において作業林道を開設した場合は RME・WF による列状間伐と RME・WF・NR による皆伐集材作業に, 幹線林道を開設した場合は RME による皆伐集材作業に採算の可能性があることが明らかになった。カラマツ 30 年生林において作業林道を開設した場合は RME・WF・NR による列状間伐と皆伐集材作業に, 幹線林道を開設した場合は RME・WF による皆伐集材作業に採算の可能性があることが明らかになった。

集材費と路網開設費の合計をみると（図-5.5~5.8）, 最大集材距離が 70 m（RME）から 100 m（WF, NR）以上になると各タワーヤードの最小値がほとんど変化していない。言いがえれば, 集材費の最小値を考慮せずに現場に応じて柔軟的に路網計画あるいは作業計画を立ててもよいということになる。図-5.8 では, 集材費と路網開設費の合計の最小値が最大集材距離が 200 m 以上のときとなるが, ある程度の生産性を確保するためには（図-5.2）, 最大集材距離を 200 m 以下にすることがのぞましい。

韓国山林庁は木材需要が増加することを予測しており国内木材供給を増加する計画であるが（山林庁, 2015a）, バイオマス利用も前提にした全木集材にして, 作業林道・幹線林道などの林道の有無, 林齢, 出材量などを考慮しながら, タワーヤードによる集材作業によって, 採算性を向上させる可能性がある。

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, そのためには路網費用の負担を軽減するためにも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, さらに 1 回当たり積載量を大きくするのが有用である。

第 6 章 終論

韓国で行われているリギダマツ 21~30 年生の皆伐におけるタワーヤード RME-300T による集材作業システムを分析した結果、出材量 $Vh=80 \text{ m}^3/\text{ha}$ の場合、集材作業費 (won/m^3) と架設・撤去費 (won/m^3) の合計が最小になる集材距離は 78 m であり、そのときの費用は $40948 \text{ won}/\text{m}^3$ であった。

同じ条件下で行われたグラップル付きバックホウの集材費 (KIM and PARK, 2013) $14549 \text{ won}/\text{m}^3$ と比べると、路網費用を除く集材作業費だけでも $20967 \text{ won}/\text{m}^3 \sim 45104 \text{ won}/\text{m}^3$ になり、グラップル付きバックホウの集材費より高費用の結果であった。タワーヤードの機械購入価格が 1 億 5000 万ウォンであり、グラップル付きバックホウの機械購入価格の 6000 万ウォンよりも 2.5 倍高く、生産性もグラップル付きバックホウの短幹集材 $34.75 \text{ m}^3/\text{日}$ と端材、枝葉、樹皮の林地残材収穫 $37.66 \text{ m}^3/\text{日}$ (KIM and PARK, 2012) に対して、タワーヤード集材は $20.3 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、作業員数もグラップル付きバックホウの 1 人に対してタワーヤードは 3 人要するため人件費も高くなり、グラップル付きバックホウによる集材よりも集材費が高くなった。しかし、グラップル付きバックホウによる集材は短幹集材、下げ荷集材に限られ、間伐地域や急傾斜地においては集材作業が不可能である。韓国の森林バイオマスの需要は 2010 年から 2014 年まで 412000 m^3 から 4605000 m^3 と増加傾向にあり、5 年間で 10 倍に増加している反面、そのうち国内供給量は 220000 m^3 から 967000 m^3 であり、残りの 192000 m^3 から 3638000 m^3 は輸入している状況である。森林バイオマスの供給のためにはタワーヤードによる全幹・全木集材が有効であり、作業現場に適切な作業システムを選択する必要がある。

RME, WF, NR を同一条件下 (韓国の 40 年生リギダマツ林, 30 年生カラマツ林) で分析した結果、最大集材距離が長くなるほど生産性は下がるが、0~57m においては RME の生産性が高く、58m 以上になると WF の生産性が高くなった。また WF と

NR を比較すると、最大集材距離が長くなるほど WF の方が生産性が高く、また 1 回当たり積載量が大きくなるほど両者の差は大きくなった。

しかし、WF と NR の機械価格が RME の機械価格より約 1.7~2 倍高く、特に WF は主索固定式（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。これにより RME が費用面で有利となった。作業林道の列状間伐では、路網費用を含めた合計費用は 64000 won/m³~96000 won/m³ であるが、1 回当たり積載量が 0.6 m³/回の皆伐ならば、60000 won/m³ 以下が実現可能である。幹線林道になると皆伐前提でも路網費用を含めた合計費用は 77000 won/m³~114000 won/m³ となった。

韓国のカラマツとリギダマツの材価は 141600 won/m³、122400 won/m³ であり（山林庁、2015b）、既往研究（KIM and PARK, 2013）の伐倒費 2099 won/m³、造材費 18597 won/m³、運材費（森林現場から 1.5 km 離れている中間土場まで）12701 won/m³ の合計費用 33379 won/m³ を勘案すると、今回の結果からリギダマツ 40 年生林において作業林道を開設した場合は RME・WF による列状間伐と RME・WF・NR による皆伐集材作業に、幹線林道を開設した場合は RME による皆伐集材作業に採算の可能性があることが明らかになった。カラマツ 30 年生林において作業林道を開設した場合は RME・WF・NR による列状間伐と皆伐集材作業に、幹線林道を開設した場合は RME・WF による皆伐集材作業に採算の可能性があることが明らかになった。韓国山林庁は木材需要が増加することを予測しており国内木材供給を増加する計画であるが（山林庁、2015a）、バイオマス利用も前提にした全木集材にして、作業林道・幹線林道などの林道の有無、林齢、出材量などを考慮しながら、タワーヤードによる集材作業によって、採算性を向上させる可能性がある。

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、そのためには路網費用の

負担を軽減するためにも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、さらに1回当たり積載量を大きくするのが有用である。最大集材距離 200 m のタワーヤーダによる集材作業であれば 45 m/ha 以上の路網密度が必要だと考えられる。しかし、韓国の林道密度は 1987 年の 0.11 m/ha から 2014 年の 2.9 m/ha であり、毎年増加し続けてはいるものの、ドイツの 46 m/ha , オーストリアの 45 m/ha , 日本の 13 m/ha に比べて極めて低い状況である(山林庁, 2015a)。韓国の林道の総距離は 2014 年現在 19077 km であり (山林庁, 2015b) , 林道密度が上記の 45 m/ha になるためにはこれからさらに 276945 km の林道を新設する必要がある。韓国戦争で荒れ果てた国土を山林緑化および燃料林として 1970 年代に植栽したリギダマツ林の木材としての価値が低く、伐期齢が過ぎたため、カラマツ林に樹種転換することを想定し、カラマツ林の伐期齢である 30 年で 45 m/ha の林道密度を実現するためには年間 92315 km の作業林道、幹線林道などの林道新設が必要である。

これから、韓国においてタワーヤーダによる集材作業システムの効率性を高めるためには、タワーヤーダオペレータ、荷かけ手、荷下し手などの作業員に対する教育・訓練が必要である。生産性を重視するのであれば WF の導入が有効であり、費用面でも競争力を得るために、仮に WF と NR の機械購入価格が現在の 25%まで低減できたとすると、作業林道を開設するリギダマツ林の皆伐の場合、WF と NR の集材費用を 55472 won/m³ と 56231 won/m³ に低減することができ、RME の 54938 won/m³ と対等になる。今後、国内で低価格のタワーヤーダを開発することも重要事項と考えられる。

引用文献

大韓建設協会（2015）2015 年下半期適用建設業賃金実態報告書. 17pp., 大韓建設協会, ソウル.

HAN, W.S., HAN, H.S., KIM, N.H., CHA, D.S., CHO, K.H., MIN, D.H., KWON, K.C. (2014) Comparison of harvesting productivity and cost of cable yarding system. Jour. Korean For. Soc. 103(1) : 87-97.

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.

今富裕樹（1994）労働科学的視点からみたトラクタ集材路間隔. 日林誌 76(5) : 402-411.

韓国石油公社(2015) 国内油価. URL : <http://www.knoc.co.kr/>, (参照 2015 年 11 月 24 日)

KIM, J.H. and PARK, S.J. (2010) An analysis of the yarding productivity and cost in forest tending operation. Jour. Korean For. Soc. 99 (4) : 625-632.

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. Jour. Korean For. Soc. 101(3): 344-355.

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. Jour. Korean For. Soc. 102 (2) : 229-238.

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.

国立山林科学院(2008) 効率的山林作業のための林内道路網配置技術. 78pp., 国立山林科学院, ソウル.

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ダ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ダ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.

仁多見俊夫(2010) 山岳森林における機械化作業システムの棲み分け—新世代タワ
ーヤーダと車両機械作業システム. 山林 1518 : 2-10.

岡勝・井上源基・小林洋司(2005) 稼動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) タワーヤーダ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) タワーヤーダによる集作業における架線張力の
分析. 森利誌 18(1) : 21-28.

PARK, S.J. (2004a) An analysis of the yarding operation system with a mobile
tower-yarder. Jour. Korean For. Soc. 93(3) : 205-214.

PARK, S.J. (2004b) The optimizing of yarding operation system with a mobile
tower-yarder. Jour. Korean For. Soc. 93(7) : 436-445.

林野庁 (2015) 平成 26 年度森林・林業白書 . URL :
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/26hakusyo/index.html> (参照 2015 年
5 月 30 日)

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.

山林庁(2015a) 山林資源. URL : <http://www.forest.go.kr/>

山林庁(2015b) 2015 年林業統計年報. 440pp., 山林庁, 大田.

山林庁・国立山林科学院(2012) 林木材積・バイオマスおよび林分収穫表. 261pp., 山林庁・国立山林科学院, ソウル.

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ダ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. 広島県林技セ研報 40 : 19-26.

山口智・鈴木秀典・梅田修史・大川畑修(2004) タワーヤーダ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.

要旨

韓国は国土面積全体の 63.9%が森林面積であり、森林のほとんどは 1970 年代に集中的に植林したものである。21 年生以上の森林は約 87%で、収穫時期である 31 年生以上の森林は約 65%である。まだ成長が旺盛な森林として森作り、間伐事業等が必要な状況である。また、韓国山林庁は木材自給率を 2014 年の 16.7%から 2017 年まで 21%に増大する方針を推進している。今後地球温暖化、二酸化炭素排出権などの気候変動に対応する環境問題と連係して健康な森林の造成と木材資源の確保のために間伐事業等の推進が必要とされている。一方、農山村の人口減少及び高齢化等によって林業労働力の確保が困難な状況であるため、森林作業において生産性の向上と労働環境の改善が必要であり、そのためには林業機械化が必要とされている。

韓国は 1967 年に山林庁が開庁され、森林作業が始められた。1970 年代の鋸と鎌による森林作業から、1980 年代にはチェーンソーの普及が始まった。また、1985 年にはオーストリアからタワーヤーダ (Koller 社, K-300) を導入し、1990 年代に日本からヤーダ集材機 (Iwafuji 社, Y-28DE) , 自走式搬器 (Iwafuji 社, BCR 08SP) などを導入した。1997 年度にはトラクタ集材機 (山林組合, HAM200) を開発し、2000 年代からは大型林業機械による森林作業時代が到来した。林業機械の活用等によって林業の生産性を向上させていくためには、その作業現場に適合する林業機械や作業システムを考えて路網を整備していくことが重要である。

また、急傾斜地が多い韓国の森林作業条件では傾斜地でも作業が可能である架線系林業機械が不可欠であり、そのためにはタワーヤーダの活用が重要と考えられる。

第 3 章では、韓国で行われているタワーヤーダの皆伐における集材作業システムを調査・分析した結果、 $Vh=80 \text{ m}^3/\text{ha}$ の場合、集材作業費 (won/m³) と架設・撤去費

(won/m³) の合計が最小になる集材距離は 78m であり、そのときの費用は 40948 won/m³であった。

同じ調査地で行われたグラップル付きバックホウの集材作業費 14549 won/m³ と比べると、本研究の $Vh=80 \text{ m}^3/\text{ha}$ の場合は集材作業費が 20967 won/m³~45104 won/m³になり、グラップル付きバックホウの集材作業費より高費用の結果であった。タワーヤードの機械購入価格が 1 億 5 千万ウォンであり、グラップル付きバックホウの機械購入価格の 6000 万ウォンよりも 2.5 倍高く、作業員数もグラップル付きバックホウの 1 人に対してタワーヤードを 3 人としたため人件費も高くなり、グラップル付きバックホウによる集材よりも集材作業費が高くなった。しかし、グラップル付きバックホウによる集材は短幹集材、下げ荷集材に限られ、間伐地域と急傾斜地においては集材作業が不可能である。したがって、作業現場に適切な作業システムを選択する必要がある。

第 4 章では、日本で行われているタワーヤード WF と NR を比較し、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ため、最大集材距離が長くなるほど WF の方が生産性が高く、また 1 回当たり積載量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 m 以下の列状間伐と最大集材距離が 88 m 以下の皆伐では NR が有利となった。集材距離が短く、1 回当たり積載量が小さいときに、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、路網開設費用を 1 回の事業で負担するものとする路網費用を含めた合計費用は 6500 円/m³ 前後になってしまうが、1 回当たり積載量が 0.8 m³/回の皆伐ならば、3000 円/m³ 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 円/m³~4445 円/m³ となった。

第 5 章では、RME, WF, NR を韓国の 40 年生リギダマツ林, 30 年生カラマツ林

を想定して分析した結果、最大集材距離が長くなるほど生産性は下がるが、0~57m においては RME の生産性が高く、58m 以上になると WF の生産性が高くなった。また WF と NR を比較すると、最大集材距離が長くなるほど WF の方が生産性が高く、また 1 回当たり積載量が大きくなるほど両者の差は大きくなった。しかし、WF と NR の機械価格が RME の機械価格より約 1.7~2 倍高く、特に WF は主索固定式（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。これにより、RME が費用面で有利となった。

1 回の架設で路網開設費を賄おうとする場合、作業林道（韓国において一定区域の山林作業施行のための幹線林道・支線林道あるいは道路から連結し設置する林道、全体幅 3.5 m（有効幅 3 m，路肩 0.25 m））を前提とする列状間伐では、路網費用を含めた合計費用は 64000 won/m³~96000 won/m³ であるが、1 回当たり積載量が 0.6 m³/回の皆伐ならば、集材費 60000 won/m³ 以下が実現可能である。幹線林道（韓国において山林の経営・管理および保護上、中枢的役割をしている林道として、道路と道路の間を連結する林道、全体幅 5 m（有効幅 4 m，路肩 0.5 m））を開設しながらの集材作業になると、皆伐前提でも路網費用を含めた合計費用は 77000 won/m³~114000 won/m³ となった。

韓国のカラマツとリギダマツの材価は 141600 won/m³，122400 won/m³ であり、既往研究の伐倒費 2099 won/m³，造材費 18597 won/m³，運材費 12701 won/m³ の合計費用 33379 won/m³ を勘案すると、今回の結果からリギダマツ 40 年生林において作業林道を開設した場合は RME・WF による列状間伐と RME・WF・NR による皆伐集材作業に、幹線林道を開設した場合は RME による皆伐集材作業に採算の可能性があることが明らかになった。カラマツ 30 年生林において作業林道を開設した場合は RME・WF・NR による列状間伐と皆伐集材作業に、幹線林道を開設した場合は RME・WF による皆伐集材作業に採算の可能性があることが明らかになった。

韓国山林庁は木材需要が増加することを予測しており国内木材供給を増加する計画であるが、バイオマス利用も前提にした全木集材にして、作業林道・幹線林道などの林道の有無、林齢、出材量などを考慮しながら、タワーヤードによる集材作業によって、採算性を向上させる可能性がある。

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、そのためには路網費用の負担を軽減するためにも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、さらに1回当たり積載量を大きくするのが有用である。最大集材距離 200 m のタワーヤードによる集材作業であれば 45 m/ha 以上の路網密度が必要だと考えられる。しかし、韓国の林道密度は 1987 年の 0.11 m/ha から 2014 年の 2.9 m/ha であり、毎年増加し続けてはいるものの、ドイツの 46 m/ha , オーストリアの 45 m/ha , 日本の 13 m/ha に比べて極めて低い状況である。韓国の林道の総距離は 2014 年現在 19077 km であり、林道密度が上記の 45 m/ha になるためにはこれからさらに 276945 km の林道を新設する必要がある。山林緑化および燃料林として 1970 年代に植栽したりギダマツ林の木材としての価値が低く、伐期齢が過ぎたため、カラマツ林に樹種転換することを想定し、カラマツ林の伐期齢である 30 年で 45 m/ha の林道密度を実現するためには年間 92315 km の作業林道、幹線林道などの林道新設が必要である。

今後、国内で低価格のタワーヤードを開発することも重要事項と考えられる。