論文

労働量，伐出材積，苗木供給量を考慮した 日本の人工林資源の長期齢級構成見通しに対する評価

中 島 徹^{1,*}・中 島 譲^{1,2}・白 石 則 彦¹

An evaluation of the future prospect of the age class distribution of Japanese plantation forests based on labor requirements, harvested timber, and nursery tree supply

Tohru Nakajima^{1,*}, Joe Nakajima^{1,2} and Norihiko Shiraishi¹

中島 徹・中島 譲・白石則彦：労働量、伐出材積、苗木供給量を考慮した日本の人工林資源の長期齢級構成見通しに対する評価，森林計画誌51：57～67, 2018 本研究においては，木材需要量，苗木生産量，林業労働量など，木材生産の制約となる因子のとり得る範囲を既往研究の予測値を参照しながら複数設定し，将来的に実行可能な主伐・再造林等の計画量およびそれにともなう齢級構成を推定するシミュレーションシステムを構築した。同システムを用いて，現在約1,000万ヘクタールの人工林の齢級別面積が，100年後にかけてどのように推移するかを推定し，どのような因子がボトルネックとなっているかを検討した。また，林野庁の定める50年後，100年後を見据えた長期的な齢級構成見通しの実現可能性についても検証した。現在から50年後にかけて，林野庁の掲げた推定値は，苗木本数や労働量不足等を理由に乖離することが見込まれるものの，100年後において，その乖離は苗木の増産を前提に縮小する傾向などが示唆された。ただし，50年から100年後においても，省力造林体系の早期の普及，需要拡大が不可欠であることなどを確認した。

Tohru Nakajima, Joe Nakajima, Norihiko Shiraishi: An evaluation of the future prospect of the age class distribution of Japanese plantation forests based on labor requirements, harvested timber, and nursery tree supply. Jpn. J. For. Plann. 51: 57~67, 2018 This study aimed to develop a simulation system that accounts for factors that could influence the future age class distribution of planted forests in Japan such as timber demand, numbers of nursery plants, and labor requirements. This simulation system was used to review the age class distributions of planted forests area(10 million ha) anticipated by Japan's Forestry Agency. The bottleneck factors affecting the Forestry Agency's anticipated age distribution were also identified. For prediction periods between 1 and 50 years, our predictions deviated substantially from the distributions anticipated by the Forestry Agency under certain labor and nursery plant number constraints. These deviations became less pronounced for prediction periods between 51 and 100 years, given an assumption of increasing nursery plant production. It was also suggested that the expanding the timber demands and low cost silviculture system are required for the anticipated age distribution between 51 and 100 years periods.

*連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: nakajima@fr.a.u-tokyo.ac.jp

1 東京大学大学院農学生命科学研究科 (113-8657東京都文京区弥生1-1-1)

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

2 みずほ証券株式会社 (100-0004 東京都千代田区大手町1-5-1 大手町ファーストスクエア)

Mizuho Securities Co., Ltd. Otemachi First Square 1-5-1, Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan

I. はじめに

今日、我が国では伐期を迎える人工林資源が増加し、豊富な人工林資源をいかにして活用し、持続的に森林を利用する計画を策定するかが重要な課題となっている。現在8～12齢級の5つの齢級に、人工林面積の約3分の2が集中するという特異な齢級構成をしており、林野庁は齢級構成の平準化に向けて、50年後、100年後を見据えた長期的な齢級構成見通し（以下「齢級構成見通し」）を作成した（林野庁、2011b）。一方でこの「齢級構成見通し」達成のためには多くの問題点が存在する。林業労働者の高齢化および減少（林野庁、2015b）、地域によっては苗木供給が不足する事例も見られている（㈱日本林業調査会、2015）。また、木材需要は2009年を底に回復傾向ではあるが、2009年の金融危機以前の水準には達していない（林野庁、2009；2015a；農林水産省大臣官房統計部、2015）。

我が国で広域に分布する森林資源の持続的利用に資する研究として、これまでも多くの検討がなされてきた。鈴木（1979）は、減反率法を用いた広義の法正林について研究を行い、森林が任意の初期齢級状態から出発しても、齢級構成は次第に平準化していき、究極的には広義の法正状態に収束することを証明した。この減反率をもちいた広範囲の資源利用に関する基礎的情報として、龍原ら（1992）は、減反率を補正し、地域の伐採性向から素材生産量の予測を行った。広嶋（2004）は、木材生産に影響を与える丸太価格から減反率を推計する方法を開発し、丸太価格に応じた収穫予測を行った。

減反率と異なるアプローチとしては、松本（2005）が、システムダイナミックスの手法で人工林施業のあり方について分析し、法正林の再評価などを行っている。一方、森林資源モデルを用いて持続可能な森林経営のための施業シナリオを提唱した例はあるものの（松本、2008）、今後の日本の森林計画のベースとなる「齢級構成見通し」について、苗木、労働量、伐出材積などの実現可能性の視点から、客観的妥当性を検討している例は少ない。具体的には、苗木、労働量、伐出材積などの林業に関する個別の問題点についての研究はなされているが、それらを加味した施業シナリオの策定には至っていないのが現状である。林野庁が示す平準化を伴った「齢級構成見通し」という、具体的な目標値に対して分析を行い、我が国の林業が実際に抱えている問題点を踏まえて現実的な施業シナリオを策定することは全国森林計画の実効性を高めるうえでも重要である。

森林資源の持続的利用や長期見通しの評価に対し、目標値を達成する際の制限として与えられた制約条件

のもとで、目的関数の値を最大または最小にする変数の値をもとめる最適化（北村、2015）の手法がもちいられてきた。林野庁の示す将来の齢級構成を目的関数とし、苗木、労働量、伐出材積などを制約条件として与えれば、国レベルで志向されている長期見通しの評価は、最適化の問題として捉えられる。森林の長期計画に関する既往研究として、南雲・古池（1981）は、LP（Linear Programming）を用いた最適化によって、民有林を広義の法正状態に近づけるための収穫計画を策定した。他方、定式化された目的関数や制約条件のうち一つでも非線形であれば、最適化は非線形計画問題となる。この場合、線形計画問題の解法である、簡約勾配法を一般化し、非線形計画問題に拡張した手法GRG（Generalized Reduced Gradient）などの、求解用アルゴリズムの有効性も示されている（木村ら、2011）。これらの最適解の探索手法は、例えば土地被覆分類などにも応用されている（Abe et al. 2014）。

本研究では、これらの求解用アルゴリズムを基礎に、上記の林野庁の指向する「齢級構成見通し」の実現可能性を評価し、計画達成に向けた望ましい施策を検討することを目的とした。まず「齢級構成見通し」を達成する場合の必要労働者数、必要苗木本数及び伐出材積を算出可能なシミュレーションシステムを構築した。齢級構成見通しの実現可能性を評価するうえで、シミュレートされた出力値との誤差二乗和を最小化する非線形の目的関数を定式化し、非線形計画問題の解法に適したGRGアルゴリズムを用いた。次に、構築したシステムをもとに、労働者数、伐出材積、苗木本数に対して現実的な制約条件を加味した場合に「齢級構成見通し」にどのような影響を及ぼすかを分析した。

II. 方法

2.1 前提条件の決定

2.1.1 齢級構成見通しにおける齢級別面積

本研究では、「森林・林業基本計画に掲げる目標数値について（案）」（林野庁、2011b）の中で示した「将来（50年後、100年後）における齢級構成（イメージ）」の齢級構成（図-1）について評価、分析を行った。

図-1 将来（50年後、100年後）における齢級構成

2.1.2 育林体系

本研究では、全国で同一の育林体系が採用されているものとし、採用されている育林体系として従来型の育林体系と省力育林体系の2通りを設定した。労働者一人の年労働日数は260日とした。育林体系の作業内容及び必要労働量は、渡邊（2011）、独立行政法人森林総合研究所（2013）、及び林業事業体の聞き取り調査事例の数値や内容を参考に作成した。その結果、従来型育林体系では、育林作業に140人日/haの労働量が必要であり、省力育林では88人日/haの労働量が必要であると仮定した。植栽本数はいずれの育林体系も2,500本/haとした。本研究では主伐再造林に主眼を置いているため、間伐材積は伐出材積に計上しなかった。11齢級～20齢級の間伐は各齢級当り2人日/haとして計算を行った。それぞれの育林体系で育林作業にかかる労働量の内訳と育林作業の詳細を表-1(a)、表-1(b)にまとめた。

表-1(a) 従来型育林体系における育林作業の労働量内訳

作業	必要労働量 単位	植栽密度 単位	備考
地植え	25人日/ha	2500 本/ha	
植付け	15人日/ha		
下刈り1y	7人日/ha		
下刈り2y	7人日/ha		
下刈り3y	7人日/ha		
下刈り4y	7人日/ha		
下刈り5y	7人日/ha		
下刈り6y	7人日/ha		
除伐	12人日/ha		
間伐	6人日/ha		
間伐	20人日/ha	2齢級 2齢級（10年生） 6齢級（30年生） 8齢級（40年生） 11齢級～20齢級	
間伐	20人日/ha		
計	140人日/ha		

表-1(b) 省力育林体系における育林作業の労働量内訳

作業	必要労働量 単位	植栽密度 単位	備考
地植え	3人日/ha	2500 本/ha	
植付け	6人日/ha		
下刈り1y	0人日/ha		
下刈り2y	7人日/ha		
下刈り3y	0人日/ha		
下刈り4y	7人日/ha		
下刈り5y	0人日/ha		
下刈り6y	7人日/ha		
除伐	12人日/ha		
間伐	6人日/ha		
間伐	20人日/ha	2齢級 2齢級（10年生） 6齢級（30年生） 8齢級（40年生） 11齢級～20齢級	
間伐	20人日/ha		
計	88人日/ha		

2.1.3 収穫表

収穫表は関東スギ地位中をもとに、1齢級及び21齢級以降は、18齢級から19齢級の成長量と19齢級から20齢級の成長量との差をもとに25齢級まで外挿し、25齢級以降は成長しないものとした*1。なお、2010年時点の統計上の人工林蓄積（林野庁、2015a）と一致させるため、齢級別材積は、上記収穫表に0.65を乗じた値を用いた。本研究は主伐に応じた齢級構成の推移に主眼を置いた研究であり、間伐材積は本研究の大局に影響を与えないと考えたため、間伐材積については考慮しなかった。使用した収穫表を表-2にまとめた。

表-2 収穫表

齢級	ha当たり材積(m ³)
1	13
2	22
3	65
4	110
5	152
6	189
7	224
8	256
9	286
10	314
11	340
12	365
13	388
14	410
15	430
16	450
17	469
18	487
19	504
20	522
21	538
22	555
23	571
24	586
25	601

2.1.4 主伐生産性と主伐開始齢級

主伐開始齢級は11齢級とした。主伐生産性は1983年から2008年の25年間の主伐生産性の上昇値（林野庁、2010）をもとにして、直線的に上昇していくものとした。また間伐材積は本研究では考慮していないため、間伐に関する生産性については定義しなかった。主伐生産性の値については表-3にまとめた。

表-3 主伐生産性

分期	生産性(m ³ /人日)
1	4.20
2	4.69
3	5.19
4	5.69
5	6.18
6	6.68
7	7.17
8	7.67
9	8.17
10	8.66
11	9.16
12	9.65
13	10.15
14	10.65
15	11.14
16	11.64
17	12.13
18	12.63
19	13.13
20	13.62

2.1.5 再造林率

再造林率は40%以上100%以下とした。ここで、各分期に主伐された面積に対して、当該分期内に再造林され、次分期に1齢級にある面積の割合を再造林率とする。わが国の林業は伐採再造林が基本であり、望ましい森林管理という側面から考えると、下限の40%という値は比較的緩やかな制約であるが、前提条件となる再造林率を高く設定することで、最適化における解探索の幅を狭めてしまうことを考慮し、敢えて低めの値を設定した。

2.2 定式化

2.2.1 目的関数の決定

GRG (Generalized Reduced Gradient) 非線形計画

法はMicrosoft Excel 2010のソルバーを用いた。分
期毎の齢級別伐採面積を計算し、50年ごとの齢級別森林
面積を求めた。「齢級構成見通し」と計算結果との齢
級別面積の差の二乗和が最小となるように二段階の最
適化を行った。まず2060年の「齢級構成見通し」に対
して最適化し、その最適解をもとに2110年の「齢級構
成見通し」に対して最適化した。

第一段階の最適化に当たり、以下のように定式化を
行った。

目的関数

最小化

$$\sum_{j=1}^{25} (Bp_{10j} - B_{10j})^2 \quad (1)$$

$$1 \leq i \leq 20 \quad (2)$$

$$1 \leq j \leq 25 \quad (3)$$

$$B_{ij} = B_{i-1j-1} - C_{ij} \quad (4)$$

Bp_{10j} : 10分期的における j 齢級の面積見通し (ha)

B_{10j} : 10分期的における j 齢級の残存面積 (ha)

i : 分期的

j : 齢級

B_{ij} : i 分期的における j 齢級の残存面積 (ha)

C_{ij} : i 分期的における j 齢級の伐採面積 (ha)

(4)式は、 i 分期的における j 齢級の残存面積は $i-1$
分期的の $j-1$ 齢級の残存面積から i 分期的における j 齢級
の伐採面積を差し引いたものであることを示している。

第一段階の最適解をもとに行う第二段階の最適化を
するに当たり、以下のように定式化を行った。

目的関数

最小化

$$\sum_{j=1}^{25} (Bp_{20j} - B_{20j})^2 \quad (5)$$

Bp_{20j} : 20分期的における j 齢級の面積見通し (ha)

B_{20j} : 20分期的における j 齢級の残存面積 (ha)

2.2.2 制約条件

育林体系は上述の従来型育林体系と省力育林体系の
2通りを想定した。

労働量制約は2010年の国勢調査結果と、田中 (2004),
独立行政法人森林総合研究所 (2012) 林・永田 (2012)
の推計を参考にして設定した。昨今の緑の雇用 (興梠,
2015) をはじめ、林業労働者の確保を試みる施策等に
鑑み、長期的には一定水準を維持し得るという仮定に
基づいて、表-4のようにまとめた。また、労働量に
関する制約を以下のように定式化した。

表-4 労働量制約

分期的	人数(人)
1	256000
2	237137
3	237137
4	237137
5	239835
6	242523
7	245220
8	245220
9	245220
10	245220
11	245220
12	245220
13	245220
14	245220
15	245220
16	245220
17	245220
18	245220
19	245220
20	245220

制約条件

$$Wa_i \leq consW_i \quad (6)$$

$$Wb_i \leq consW_i \quad (7)$$

$$W_i = \sum_{j=1}^{25} (B_{ij} - w_j) \div d + V_i \div (e_i \times d) \quad (8)$$

$$d = 260 \quad (9)$$

$consW_i$: i 分期的の労働量制約上限 (人)

W_i : i 分期的の必要労働量 (人)

Wa_i : 従来型育林体系における i 分期的の必要労働量 (人)

Wb_i : 省力育林体系における i 分期的の必要労働量 (人)

w_j : j 齢級の林分の育林にかかる労働量 (人日/ha)

d : 労働者一人当たりの年労働日数 (日/年)

伐出材積制約では以下の2通りの制約を置いた。ひ
とつは立木ベースで8,000万 m^3 /年を上限、2,000万
 m^3 /年を下限 (林野庁, 2015a, b) にしたものである。
もう一つは2030年の目標値5,000万 m^3 /年 (林野庁,
2011a, b) を参考にした上限、2,000万 m^3 /年を下
限として制約を置いたものである。

苗木本数制約は林業統計要覧 (林野庁, 2015b) の
1955-1960の山行き苗木供給量の増加割合11.4%/5
年と、同2010年の供給量6,000万本をもとに上限を設
定した。詳細は表-5にまとめた。

表-5 苗木本数制約

分期的	本数(百万本)
1	334
2	372
3	415
4	462
5	515
6	573
7	639
8	712
9	793
10	883
11	984
12	1096
13	1221
14	1360
15	1515
16	1688
17	1880
18	2094
19	2333
20	2599

また、伐出材積および苗木本数、再造林率に関して、制約を以下のように定式化した。

制約条件

$$V_i = \sum_{j=1}^{25} v_j - C_{ij} \quad (10)$$

$$2 \times 10^7 \leq V_i \leq 5 \times 10^7 \quad (11)$$

$$2 \times 10^7 \leq V_i \leq 8 \times 10^7 \quad (12)$$

$$N_i = R_i \times n \quad (13)$$

$$N_i \leq consN_i \quad (14)$$

$$n = 2500 \quad (15)$$

$$40 \leq r_i \leq 100 \quad (16)$$

$$r_i = (R_i \div C_i) \times 100 \quad (17)$$

V_i : i 分期の伐出材積

v_j : j 齢級の ha 当り材積 (m^3/ha)

N_i : i 分期の必要苗木本数

$consN_i$: i 分期の苗木本数制約上限

n : 植栽密度 (本/ha)

r_i : i 分期における再造林率 (%)

R_i : i 分期の再造林面積 (ha)

C_i : i 分期の伐採面積 (ha)

2.2.3 シナリオ

最適化の計算は、以下の8通りのシナリオで行った。

I 制約なしシナリオ

シナリオ1 育林体系：従来型育林体系，制約：なし

シナリオ2 育林体系：省力育林体系，制約：なし

II 制約あり

シナリオ3 育林体系：従来型育林体系，制約：労働量制約あり，苗木制約あり，材積制約なし（制約式：(6)，(8)，(13)，(14)）

シナリオ4 育林体系：省力育林体系，制約：労働量制約あり，苗木制約あり，材積制約なし（制約式：(7)，(8)，(13)，(14)）

シナリオ5 育林体系：従来型育林体系，制約：労働量制約あり，苗木制約あり，材積制約8,000万 m^3 /年（制約式：(6)，(8)，(10)，(12)，(13)，(14)）

シナリオ6 育林体系：省力育林体系，制約：労働量制約あり，苗木制約あり，材積制約8,000万 m^3 /年（制約式：(7)，(8)，(10)，(12)，(13)，(14)）

シナリオ7 育林体系：従来型育林体系，制約：労働量制約あり，苗木制約あり，材積制約5,000万 m^3 /年（制約式：(6)，(8)，(10)，(11)，(13)，(14)）

シナリオ8 育林体系：省力育林体系，制約：労働量制約あり，苗木制約あり，材積制約5,000万 m^3 /年（制約式：(7)，(8)，(10)，(11)，(13)，(14)）

上述の各シナリオに基づいて計算した伐採面積の結

果から必要な労働量，苗木本数，伐出材積などを算出し，「制約なし」の場合と「制約あり」の場合の結果を比較した。また，「制約あり」の場合に計算された50年毎の齢級別森林面積を「齢級構成見通し」と比較した。

III. 結果と考察

3.1 制約なしのシナリオ

3.1.1 齢級構成

シナリオ1，2には前提条件以外の制約がないため，齢級構成は両シナリオともに2060年，2110年での長期見通しに一致した。なお，最適化されたこの場合も含め，あくまで50年ごとの最適化であることから，目的関数に至るまでの実行可能解は唯一でない可能性はある。

3.1.2 必要労働量

2010年の林業従事者数は51,200人であり（総務省統計局，2013），分期当りに直すと256,000人日となる。このことを鑑みると，どちらの造林体系でも将来的に現状以上の労働量の確保が必要である。特に1分期から3分期の計画初期での大幅な増員が必要であることが分かった（表-6(a)，表-6(b)）。また，シナリオ1とシナリオ2を比較すると，計画期間後半にかけて必要労働量の差が大きくなり，その後その差が常態化する傾向となった。シナリオ1では従来型育林体系を採用し，シナリオ2では省力育林体系を採用しており，計画期間後半にかけて齢級構成が平準化されることから，保育にかかる労働量の影響が大きいと考えられる。尚，表-6(a)，表-6(b)の数値は分期当りの必要労働量である。

表-6(a) シナリオ1における必要労働量 表-6(b) シナリオ2における必要労働量

分期	人数(人日)	分期	人数(人日)
1	331,509	1	301,320
2	377,000	2	340,774
3	329,383	3	288,326
4	294,658	4	241,526
5	266,248	5	202,852
6	267,169	6	191,094
7	302,661	7	216,321
8	327,159	8	233,574
9	347,859	9	247,633
10	358,818	10	254,969
11	283,181	11	203,483
12	284,309	12	196,762
13	286,927	13	207,229
14	281,378	14	208,925
15	283,734	15	210,678
16	276,472	16	205,227
17	288,835	17	216,986
18	295,524	18	224,279
19	326,301	19	253,848
20	356,077	20	277,587

3.1.3 伐出材積

伐出材積はシナリオ1, 2ともに同じ結果となった。まず、分期毎の伐出材積の変化に着目すると、全体として増加傾向ではあるが、伐出材積の増減が激しい。そのため、不安定な木材供給に陥る可能性が考えられる。次に伐出材積の数値に着目すると、第2分期以降の伐出材積は4,000万 m³/年を超えるが、その後も増加傾向を示し20分期には1.1億 m³/年を超えた(表-7(a), 表-7(b))。これは、「齢級構成見通し」において人工林の皆伐面積を増やす目標設定がなされている影響が大きかったと考えられる。また、現状の国内における木材需要7,580万 m³/年(林野庁, 2016)を鑑みると、この結果で示された材積はかなりの供給過剰であると考えられる。

表-7(a) シナリオ1における分期別伐出材積 表-7(b) シナリオ2における分期別伐出材積

分期	材積(百万m ³)	分期	材積(百万m ³)
1	125	1	125
2	205	2	205
3	223	3	223
4	202	4	202
5	174	5	174
6	168	6	168
7	240	7	240
8	270	8	270
9	312	9	312
10	339	10	339
11	243	11	243
12	229	12	229
13	239	13	239
14	258	14	258
15	261	15	261
16	248	16	248
17	287	17	287
18	344	18	344
19	450	19	450
20	561	20	561

3.1.4 必要苗木本数

分期毎の必要苗木本数はシナリオ1, 2ともに同じ結果となった(表-8(a), 表-8(b))。必要苗木本数の変化に着目すると、どちらのシナリオでも必要苗木

表-8(a) シナリオ1での必要苗木本数 表-8(b) シナリオ2での必要苗木本数

分期	本数(百万本)	分期	本数(百万本)
1	377.4	1	377.4
2	452.8	2	452.8
3	513.2	3	513.2
4	664.2	4	664.2
5	792.5	5	792.5
6	950.9	6	950.9
7	1,079.2	7	1,079.2
8	1,169.8	8	1,169.8
9	1,252.8	9	1,252.8
10	1,298.1	10	1,298.1
11	996.2	11	996.2
12	1,094.3	12	1,094.3
13	996.2	13	996.2
14	905.7	14	905.7
15	913.2	15	913.2
16	890.6	16	890.6
17	898.1	17	898.1
18	890.6	18	890.6
19	905.7	19	905.7
20	981.1	20	981.1

本数は10分期までは増加傾向であり、その後安定している。この傾向は3.1.2で述べた、シナリオ1とシナリオ2の必要労働量の差と同じ傾向を示している。また、必要苗木本数の増加率は最大で29.4%となり、過去の苗木供給の増加率よりも大きな割合となった。尚、表の数値は分期当りの必要苗木本数である。

3.2 制約ありのシナリオ

3.2.1 齢級構成

制約ありのいずれのシナリオにおいても、齢級構成見通しを達成することはできないとわかった(図-2(a), 図-2(b), 図-2(c), 図-2(d))。制約により伐採面積および材積が減少し、その分植栽面積も減少する結果となった。そのため、各シナリオにおいて計画期末の人工林面積は現状より減少するが、「齢級構成見通し」と比べると大きくなった。ただし、シナリオ4の2110年に関しては、10齢級以降に不一致がみられるのみで、それ以外の齢級においては、齢級構成見通しとはほぼ一致していた。シナリオ4とは、育林体系：省力育林体系、制約：労働量制約あり、苗木制約あり、材積制約なし(制約式：(7), (8), (13), (14))を前提としている。したがって、省力育林体系の普及と、出材量に見合う十分な需要を担保することができるならば、労働量や、苗木の制約を考慮しても、2110年後の齢級構成見通しは達成し得る可能性を見込めることが示唆された。

程度の差はあるものの、どのシナリオにおいても2060年の齢級別面積を見ると、高齢林ほど伐採されずに残り、若齢林は見通しの面積に達しない結果となった。2110年では25齢級以上的高齢林が多く残ったシナリオが多い。この傾向は伐出材積に制約のあるシナリオで特に顕著にみられることから、伐出材積に制約がある中で、ha当りの材積が大きい高齢林の伐採が控えられた影響が大きいと考えられる。一方、出材量の制約を8,000万 m³/年とおいた場合と、「材積制約なし」の場合とで、齢級構成の結果に変化が見られなかった。このことは、上記の出材量に見合う需要を確保することができれば、本論の前提で、出材量の供給過多は齢級構成見通しの達成に影響しない可能性のあることを示唆するものである。シナリオ3とシナリオ5、およびシナリオ4とシナリオ6は同じ結果であったため、以降は、シナリオ3と4の結果のみ表示することとする。

3.2.2 労働量

伐出材積に制約を課していないシナリオ3と5において、労働量が制約に達していた(表-9(a))。これに対し、残りのシナリオでは、いずれの分期においても制約に達していなかった(表-9(b), 表-9(c),

表-9(d))。また、いずれのシナリオにおいても、計画期間後半では、相対的に少ない労働量で済んでいる。これは、計画期間の経過するにつれて、人工林の総面積が減少し、造林以降の施業に要する労働量が減少することなどが理由と考えられる。

また、シナリオ3、5と異なり、その他のシナリオで労働量が制約となっていないのは、省力育林体系による保育労働量の減少と伐出材積の制約の影響が大きいと考えられる。

3.2.3 伐出材積

伐出材積に制約のないシナリオ3、シナリオ4では伐出材積は上昇し続ける傾向となった(表-10(a),

表-10(b))。シナリオ7、シナリオ8も伐出材積は増加し続け、制約に達することで頭打ちとなっている(表-10(c), 表-10(d))。また、伐出材積の制約は計画期間の後半に強く影響を与えていることもわかった。従来型育林体系のシナリオと省力育林のシナリオを比較すると、省力育林のシナリオの方が高い伐出材積を示す、あるいは早く制約に達する結果となった。

シナリオ3、シナリオ4では、省力育林体系のシナリオ4が高い伐出材積を示しているが、これは齢級構成見通しを大きく下回る伐出量である上に、育林に労働量がかからない分、伐採に労働量を割くことができているためであると考えられる。

図-2(a) シナリオ3での齢級構成と長期見通しとの比較
2060年(上), 2110年(下)

図-2(b) シナリオ4での齢級構成と長期見通しとの比較
2060年(上), 2110年(下)

図-2(c) シナリオ7での齢級構成と長期見通しとの比較
2060年(上), 2110年(下)

図-2(d) シナリオ8での齢級構成と長期見通しとの比較
2060年(上), 2110年(下)

表-9 (a) シナリオ3における労働量

分期	人数(人)	制約(人)
1	255,073	256,000
2	237,137	237,137
3	237,137	237,137
4	236,326	237,137
5	232,542	239,834
6	242,522	242,522
7	229,610	245,220
8	230,237	245,220
9	230,627	245,220
10	230,348	245,220
11	239,125	245,220
12	237,872	245,220
13	242,298	245,220
14	245,220	245,220
15	245,220	245,220
16	227,548	245,220
17	231,648	245,220
18	238,743	245,220
19	239,994	245,220
20	241,082	245,220

表-9 (b) シナリオ4における労働量

分期	人数(人)	制約(人)
1	238,527	256,000
2	227,433	237,137
3	217,454	237,137
4	214,657	237,137
5	217,763	239,834
6	225,379	242,522
7	230,809	245,220
8	223,197	245,220
9	219,572	245,220
10	238,211	245,220
11	185,996	245,220
12	199,765	245,220
13	214,611	245,220
14	203,272	245,220
15	215,604	245,220
16	188,476	245,220
17	184,299	245,220
18	234,103	245,220
19	175,405	245,220
20	210,874	245,220

表-10(a) シナリオ3における伐出材積

分期	材積(百万m ³)
1	118
2	115
3	138
4	152
5	169
6	181
7	186
8	177
9	178
10	184
11	261
12	305
13	316
14	292
15	322
16	323
17	346
18	366
19	363
20	360

表-10(b) シナリオ4における伐出材積

分期	材積(百万m ³)
1	131
2	137
3	158
4	180
5	206
6	240
7	274
8	262
9	266
10	321
11	204
12	242
13	299
14	297
15	353
16	273
17	257
18	425
19	216
20	349

表-9 (c) シナリオ7における労働量

分期	人数(人)	制約(人)
1	251,320	256,000
2	232,430	237,137
3	233,337	237,137
4	234,615	237,137
5	238,396	239,834
6	224,956	242,522
7	223,186	245,220
8	228,394	245,220
9	226,610	245,220
10	228,091	245,220
11	243,962	245,220
12	218,359	245,220
13	232,455	245,220
14	234,384	245,220
15	228,465	245,220
16	221,276	245,220
17	215,104	245,220
18	212,257	245,220
19	205,049	245,220
20	211,925	245,220

表-9 (d) シナリオ8における労働量

分期	人数(人)	制約(人)
1	235,272	256,000
2	234,078	237,137
3	229,546	237,137
4	227,808	237,137
5	229,796	239,834
6	227,642	242,522
7	219,143	245,220
8	218,953	245,220
9	214,029	245,220
10	208,305	245,220
11	196,317	245,220
12	175,130	245,220
13	170,385	245,220
14	172,648	245,220
15	169,429	245,220
16	160,838	245,220
17	158,820	245,220
18	159,834	245,220
19	151,314	245,220
20	158,275	245,220

表-10(c) シナリオ7における伐出材積

分期	材積(百万m ³)	制約(百万m ³)
1	113	250
2	114	250
3	133	250
4	148	250
5	163	250
6	159	250
7	158	250
8	153	250
9	159	250
10	166	250
11	243	250
12	250	250
13	250	250
14	250	250
15	250	250
16	250	250
17	250	250
18	250	250
19	250	250
20	250	250

表-10(d) シナリオ8における伐出材積

分期	材積(百万m ³)	制約(百万m ³)
1	127	250
2	146	250
3	175	250
4	199	250
5	224	250
6	238	250
7	242	250
8	245	250
9	246	250
10	247	250
11	250	250
12	250	250
13	250	250
14	250	250
15	250	250
16	250	250
17	250	250
18	250	250
19	250	250
20	250	250

3.2.4 苗木本数

どのシナリオにおいても、計画期間初期の段階では現状の6,000万本/年の水準を下回っている。これは初期状態で齢級別面積のピークとなる齢級の面積が、齢級構成見通しと最も不一致が大きいことの影響である。この不一致を解消するために伐採面積の確保が最適化において最優先され、結果的に再造林率が下限で推移し、苗木の必要量が制約上限に達しない結果となった。本研究での再造林率の下限そのものが望ましい森林管理に対して、必ずしも高いものではない。さらに実際は条件の良い森林ほど伐採される可能性が高く、早期に伐採される人工林ほど再造林率の必要性も高い。苗木の不足が実際に報告されている現状から鑑みても、この結果は苗木の増産の緊急性を否定するものではないと考えられる。また、再造林率を低く設定した本研究においても、およそ第3分期を境に6,000万本/年の水準を超え、将来的には1.5億本/年以上の供給が必要なシナリオもあることから、将来的な苗木のさらなる

需要は十分に見込まれる。また、省力育林体系のシナリオでは第10分期以降に、苗木が制約の上限に達する場合があった(表-11(b)、表-11(d))。一方で従来型育林体系のシナリオでは第10分期以降に、苗木が制約に達することはなかった(表-11(a)、表-11(c))。

省力育林体系のシナリオで苗木が制約に達していることから、将来的な苗木の不足は十分に考えられる。そのため、将来を見据えた計画的な苗木増産体制を整えることは重要であると考えられる。また、どのシナリオでも苗木本数は単調増加の傾向が続いていることから、計画的な山側の再造林によって、安定した需要が苗木生産者は設備費用などの増産に向けた先行投資に踏み切ることができると考えられる。

3.2.5 シナリオのまとめ

以上のように、本研究で構築したシステムによって必要労働量、伐出材積、必要苗木本数の算出を行った。これらの算出結果から、齢級構成見通しに対する実現可能性を評価することができた。

さらに、必要労働量、伐出材積、必要苗木本数に制

表-11(a) シナリオ3における苗木本数

分期	本数(百万本)	制約(百万本)
1	334	334
2	336	372
3	415	415
4	462	462
5	447	515
6	573	573
7	512	639
8	600	712
9	662	793
10	685	883
11	563	984
12	549	1096
13	599	1221
14	771	1360
15	679	1515
16	587	1688
17	617	1880
18	677	2094
19	693	2333
20	718	2599

表-11(b) シナリオ4における苗木本数

分期	本数(百万本)	制約(百万本)
1	334	334
2	372	372
3	415	415
4	462	462
5	515	515
6	573	573
7	639	639
8	712	712
9	793	793
10	883	883
11	984	984
12	1094	1096
13	996	1221
14	906	1360
15	913	1515
16	889	1688
17	897	1880
18	891	2094
19	907	2333
20	981	2599

表-11(c) シナリオ7における苗木本数

分期	本数(百万本)	制約(百万本)
1	334	334
2	301	372
3	415	415
4	462	462
5	515	515
6	490	573
7	582	639
8	637	712
9	670	793
10	714	883
11	665	984
12	528	1096
13	778	1221
14	762	1360
15	735	1515
16	709	1688
17	692	1880
18	684	2094
19	674	2333
20	678	2599

表-11(d) シナリオ8における苗木本数

分期	本数(百万本)	制約(百万本)
1	334	334
2	372	372
3	415	415
4	462	462
5	515	515
6	573	573
7	639	639
8	712	712
9	793	793
10	883	883
11	752	984
12	502	1096
13	738	1221
14	685	1360
15	677	1515
16	509	1688
17	661	1880
18	671	2094
19	683	2333
20	677	2599

約を加えることで、齢級構成見通しにどのような影響を与えるかを分析することもできた。シナリオ3, 4, 7, 8において、推定された100年後の総面積は、630万 ha, 629万 ha, 734万 ha, 618万 haであった。この総面積のうち、20齢級以下の面積は、419万 ha, 578万 ha, 474万 ha, 487万 haであった。これらの面積は、予測期間において、最低一回は主伐・再造林されていることから、各シナリオにおける循環可能な木材生産林の面積の目安となり得ると考えられる。

林野庁(2012)では、林業労働力の量的・質的推移や木材需要を考慮した、森林資源の2030年に至る長期動態分析がなされている。本研究で構築したシステムでは、比較的簡便ではあるものの、苗木・労働量・出材量などマクロな総量をトータルでモデル化し、国レベルの計画量の妥当性を検証可能とした点において意義深い。また本システムでは、労働量、伐出材積、苗木供給量などの制約のみならず、前提条件としている再造林率や主伐効率などの条件も変化させることができ、さまざまなシナリオを想定することが可能である。

100年という長期間の分析を行う上で、起こりうる条件や制約の変更を反映させて、本システムを政策立案に利用することなどが考えられる。

本論の結果を踏まえると、「齢級構成見通し」を実現するためには、労働量を現状以上に維持し、伐出材積と苗木本数を現状から大幅に増加させる必要があることが明らかになった。コンテナ苗の活用などに見られる技術の発展や、5年間で11.4%の苗木の増産を達成した1950年代と比較して、苗木業者の大規模化が進んでいる現状(林野庁, 2015b)を鑑みると、苗木増産のハードルは比較的低いと考えられる。しかし、林業労働量の減少は減少幅に歯止めはかかっているものの、さらなる減少が見込まれている(田中, 2004)。また、建築用材の需要に大きく影響を及ぼす新設住宅着工戸数は減少が見込まれており(株式会社野村総合研究所, 2015)、木材需要全体の減少も予測されている(森林総合研究所, 2012)。労働量の減少を食い止め、需要を大きく上回る木材供給の実現は困難だと考えられる。また、減少傾向を示す労働量・木材需要に反してそれらを増やす前提となっている点からも、この見通しは達成困難であると考えられる。さらに、「齢級構成見通し」を達成するにあたり、労働量、苗木本数、需要を超える木材供給がボトルネックとなることが明らかになった。従来型育林体系と省力育林体系の労働量への影響の違いを比較してわかった通り、労働量の問題を解決するためには、省力造林体系の早期の普及が重要と言える。

今後、人工林資源から供給される大量の木材を消費するため、CLTや木質バイオマス発電、木材輸出などの新規需要を確実に創出し、拡大していくことが不可欠である。さらに、将来的な人工林面積の減少に伴い、天然林や複層林への確実な誘導の技術開発や、それらの森林の適切な管理も今後の課題と考えられる。なお、本論の計算は、収穫表等を全国一律としており、実際には、各資源が地域に偏在することが避けられないため、やや楽観的な結果であることを考慮しなければならない。

IV. おわりに

本研究は、木材需要量、苗木生産量、林業労働量の制約条件の下で、指向されている将来の齢級構成を目的関数とする実行可能な主伐・再造林等の計画量を推定するシステムを構築した。林野庁の指向する50年後、100年後の齢級構成において、現在約1,000万ヘクタールの人工林がどのように推移するかを推定した。また、制約条件について複数設定したシナリオによって、変化する目的関数の違いを比較することによって、

今後、50年にわたって、指向する年齢構成に近づけていくためには、苗木本数や労働量の不足の解消が特に重要であることがわかった。さらに、50年後から100年後にかけては、労働量および供給量に見合う需要量の確保等が特に重要であることが示唆された。

本研究は、林野庁の50年、100年後の、非連続かつシンプルな見通しを前提に、制約条件を付した最適化によって、100年後までの連続的な予測を可能としている。反面、あくまで50年ごとの最適化であることから、目的関数に至るまでの実行可能解は唯一でない可能性はある。

本論において、国策として志向する年齢構成の長期見通しを実現するうえで、求められる補助金等の財源的根拠のように、行政の意思決定で制御できるもの以外の、労働量、苗木本数、木材需要量の確保など、長期見通しの実現に求められる必要条件に焦点を絞っている。志向する年齢構成の誘導に求められる国庫補助金等を制約条件として課すことによって、より政策決定に資する予測を可能とすることは、今後の研究の課題である。

引用文献

- Abe, BT, Olugbara, OO, Marwala, T (2014) Experimental comparison of support vector machines with random forests for hyperspectral image land cover classification. *Journal of earth system science* 123, 779-790.
- (株)日本林業調査会 (2015) 林政ニュース514. pp23, (株)日本林業調査会, 東京.
- 株式会社野村総合研究 (2015) 2030年度の新設住宅着工戸数は53万戸に減少〜リフォーム市場規模は、6兆円台で横ばいに〜. https://www.nri.com/jp/news/2015/150615_1.aspx (2016年2月9日取得)
- 北村充 (2015) 数理計画法による最適化. pp183, 森北, 東京.
- 木村俊房, 茨木俊秀, 飯高茂, 西川青季 (2011) 最適化の数学. pp240, 共立出版, 東京.
- 興梠克久 (2015) 「緑の雇用」のすべて. pp321, 日本林業調査会, 東京.
- 鈴木太七 (1979) 森林経営学. pp191, 朝倉書店, 東京.
- 総務省統計局 (2013) 平成22年国勢調査報告第5巻その1全国編. 総務省統計局, 東京.
- 龍原哲・小幡浩司・箕輪光博 (1992) 流域における伐採の動向と素材生産量の予測: 福島県奥久慈川流域の事例. *森林計画学会誌*19, 1-30.
- 田中亘 (2004) 2000年国勢調査から見る林業作業数の変化. *森林応用研究*13(1), 19-24.
- 寺下太郎・永田信 (1994) 『国勢調査』に見る林業就業者の推移—コウホート法による分析—. *林業経済*47(4), 14-22.
- 独立行政法人森林総合研究所・九州大学・宮崎大学・徳島県・高知県 (2013) 低コスト再造林の実用化に向けた研究成果集. pp45, 独立行政法人森林総合研究所九州支所. <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/3rd-chukiseika.7.pdf> (2016年2月5日取得)
- 独立行政法人森林総合研究所 (2012) 改訂森林・林業・木材産業の将来予測—データ・理論・シミュレーション—. pp377, 日本林業調査会, 東京.
- 南雲秀次郎・古池篤 (1981) 民有林の施業計画策定に関する研究(I): 地域森林計画における人工林の伐採量および造林面積の決定. *日本林学会誌*63(3), 79-89.
- 農林水産省大臣官房統計部 (2015) 平成25年木材需給報告書. pp222, 一般財団法人農林統計協会, 東京.
- 林宇一・永田信 (2012) 「国勢調査」における産業分類及び職業分類上の林業の変遷と林業労働者総数の推計. *林業経済*64(10), 2-17.
- 広嶋卓也 (2004) 丸太価格に基づく民有人工林の収穫予測に関する研究. pp104, 東京大学大学院農学生命科学研究科学学位論文, 東京.
- 正木隆 (2017) 生態学の立場からみた主伐と再造林. *山林*1596, 2-10.
- 松本美香・泉英二・藤原三夫 (2005) 今後のわが国における人工林施業のあり方—法正林の再評価—. *日本森林学会大会発表データベース*116(0), 134-134.
- 松本美香・泉英二・藤原三夫 (2008) 持続可能な森林経営のための施業シナリオ—森林資源予測モデルを用いた全国民有林での検討—. *愛媛大学農学部演習林報告*45-47, 7-13.
- 林野庁 (2009) 平成21年版森林・林業白書. pp145, 財団法人農林統計協会, 東京.
- 林野庁 (2011a) 森林・林業基本計画. pp35, 林野庁, 東京.
- 林野庁 (2011b) 森林・林業基本計画に掲げる目標数値について (案). <http://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/singikai/pdf/siryou4.pdf> (2016年2月5日取得)
- 林野庁 (2014) 平成26年版森林・林業白書. pp225, 一般財団法人農林統計協会, 東京.
- 林野庁 (2015a) 平成27年版森林・林業白書. pp225, 一般財団法人農林統計協会, 東京.
- 林野庁 (2015b) 2015森林・林業統計要覧. pp260,

林野庁，東京．

林野庁（2016）平成28年版森林・林業白書．pp240，

財団法人農林統計協会，東京．

渡邊卓（2011）労働量を考慮したスギ・ヒノキ人工林
施業計画の策定．pp38，東京大学大学院農学生
命科学研究科森林科学専攻修士論文，東京．

注

- * 1 正木（2017）の指摘するように，「高齢級でも成長が持続する」という見解も存在する。他方，そのような見解を前提に，現時点で我が国の森林簿をはじめとする林業統計へ，十分に高齢林の持続的成長を反映されているとはいいいがたい。したがって，本論では現状，行政の前提とする資源量との整合性から25齢級以降は成長しないと仮定することとした。

（2017年4月10日受付）

（2017年12月15日受理）