

トドマツ人工林の地位指数曲線の改訂

滝谷 美香

Site index curve estimation of *Abies sachalinensis* plantation forest in Hokkaido, Japan

Mika TAKIYA

要 旨

高齢級林分に対応した、トドマツ人工林の収穫予測を行うために必要な、新たな地位指数曲線の改訂を行った。全道1,897林分のデータを用い、ゴンペルツ関数、ロジスティック関数、ミッチャーリッヒ関数、およびリチャーズ関数に対して非線形回帰を行ったところ、樹高成長曲線としてリチャーズ関数が選択された。この樹高成長曲線を地位指数曲線のガイドカーブとし、地位指数12~24の地位指数曲線群を作成した。データとして利用した各林分の平均地位指数は 17.50 ± 3.35 となった。本研究により得られた地位指数曲線群は、「北海道版トドマツ人工林収穫予測ソフトver1.3」において使用されている。今後はトドマツ人工林の施業計画の立案などに活用されることが期待される。

キーワード：トドマツ人工林、地位指数曲線、樹高成長曲線、リチャーズ関数

はじめに

北海道のトドマツ人工林は現在、間伐から主伐期を迎える林分が増えている。トドマツ人工林の施業計画を立てるためには、これまでは北海道立総合研究機構林業試験場が作成したトドマツの収穫予測表（北海道林務部1988）を基準に、植栽密度、仕立て方、間伐率、伐期などを検討し収穫予測が行われてきた。収穫予測の基礎となる林分成長量は、立地条件に依存する樹高成長量から推定される。この立地条件と樹高成長の関係を表すのが地位指数曲線であり、様々な条件の林分における林齢と樹高の関係から曲線式が提示される。しかし、従来の収穫予測表で基準とした地位指数曲線の作成にあたっては、高齢級林分が少なかった時代のデータを用いているため、60年生を超える成長予測は外挿によるものであり、誤差が大きいと考えられる。このため、高齢級林分に対応できるよう、地位指数曲線を改訂することが必要である。

本報告では、2,000点近い北海道内のトドマツ人工林分データを用い、人工林の高齢化にも対応した収穫予測に必要な地位指数曲線の改訂を行うことを目的とした。

試料および方法

本報告で使用したデータは、北海道林務部が1972年~1978年にかけて実施した地位指数調査、および森林総合研究所が主体で調査を行った、平成15年度（2003年）森林吸収源データ緊急整備事業によるデータである。トドマツ林分数1,897林分（林齢4~89年生）にのぼるこれらのデータから、北海道の一般民有林および道有林の地位指数曲線を作成した。

上記調査では、データは林分単位で0.0105ha~0.96haの標準地を設定し、立木の胸高直径（cm）と樹高（m）を測定している。各林分の上層高（m）は、樹高の高い個体から250本/haに相当する立木の平均値とした。林齢（年）と上層高との関係について、これまでいくつかの成長関数による推定結果（松下ほか2004など）が示されている。ここでは、一般的に用いられることの多い、ゴンペルツ（Gonpertz）式（式-1）、ロジスティック（Logistic）関数（式-2）、ミッチャーリッヒ（Mitscherlich）関数（式-3）、およびリチャーズ（Richards）関数（式-4）を用い、それぞれの当てはまりを比較し、最も当てはまりの良い樹高成長曲線を決定した。

$$H_t = a * \exp(-b * \exp(-c * t)) \quad \text{式-1}$$

北海道立総合研究機構林業試験場

Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Bibai, Hokkaido, 079-0198

[北海道林業試験場研究報告 第51号2014年3月 Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 51 March 2014]

$$H_t = a / (1 + b * \exp(-c * t)) \quad \text{式-2}$$

$$H_t = a * (1 - b * \exp(-c * t)) \quad \text{式-3}$$

$$H_t = a * (1 - \exp(-b * t))^c \quad \text{式-4}$$

ただし、 t は林齢、 H_t は林齢 t における上層高、 a, b, c は推定するパラメータ、 \exp は指数関数をそれぞれ示す。式-4のリチャーズ関数は、林齢0で原点0を通り、その他の関数は限定しない。

解析には、非線形回帰を用いた。非線形回帰は、残差平方和(RSS)が最小となった場合に収束したとみなすよう、繰り返し計算を行った。残差平方和は以下の式により計算した。

$$RSS = \sum_{i=1}^n (h_i - f(t_i))^2 \quad \text{式-5}$$

ただし、 h_i は、 i 番目の林分の実測された平均上層高、 $f(t)$ は林齢 t により予測された上層高、 n は試料数をそれぞれ示す。非線形回帰によって求められた樹高曲線について、上層高と林齢との関係を良く説明する関数を選択するために、赤池情報量基準(AIC)を用いて比較した。AICは次式により計算した。

$$AIC = n \log(2\pi) + n \log(RSS/n) + 2p + n \quad \text{式-6}$$

ただし π は円周率、 \log は自然対数、 p はパラメータ数を示す。

式-1～4において、AICが最小となる関数を、最も当てはまりの良い樹高成長曲線とし、地位指数曲線のガイドカーブとした。ガイドカーブ上の基準林齢を40年とし、西沢・真下(1966)による比例の式(式-7)により、地位指数曲線群を作成した。

$$SI = H_{it} * H_{40} / H_t \quad \text{式-7}$$

ただし、 H_{it} はある林分 i における林齢 t 年の上層高、 H_{40} は林齢40年時のガイドカーブ上の樹高、 H_t は林齢 t 年のガイドカーブ上の上層高の値である。

計算はフリーの統計解析ソフトウェアR version 3.0.2 (R Development Core Team 2013)を用い、非線形回帰には関数optim(アルゴリズム: Nelder-Mead法(Nelder & Mead 1965))を使用した。

結果と考察

成長関数への非線形回帰

式-1～5に対する非線形回帰の結果、それぞれのパラメータを決定した。各成長関数で決定された樹高成長曲線を図-1に示した。

それぞれの樹高成長曲線は、概ね全データの平均的な値をとった。20年生～60年生の当てはまりは、成長曲線間で大きな差はないが、10年生以下の若齢林や、70年生以上の高齢林で、樹高成長曲線による差が現れている。

自由度調整済み決定係数は、ゴンペルツ関数で0.769、ロジスティック関数で0.750、ミッチャーリッヒ関数で0.763、およびリチャーズ関数で0.763であった。また、AICはそれぞれ、9593.076、9672.287、9563.561、および9560.506であった。AIC

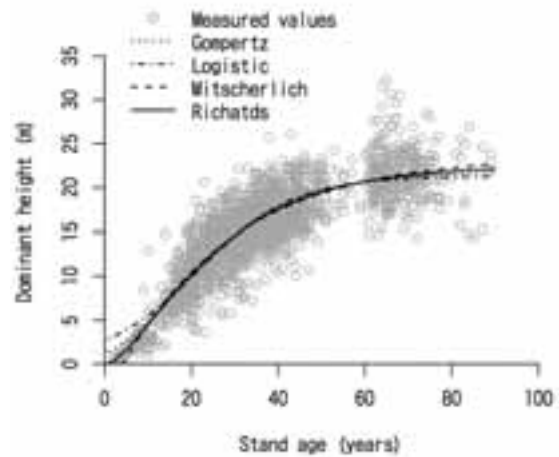


図-1 非線形回帰による林齢と上層高との関係の推定結果

Fig. 1 Relationship of dominant height and stand age, and estimated tree height growth curves.

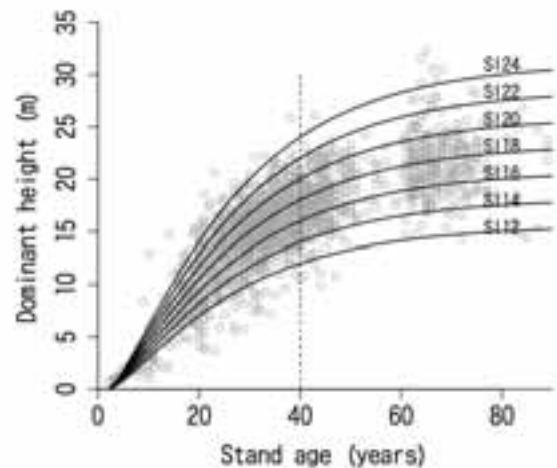


図-2 リチャーズ曲線により算出したガイドカーブを基に描いた地位指数曲線(地位指数12～24) 灰色○：実測値；SI：地位指数；垂直破線：基準年である40年生時

Fig. 2 Site index curves estimated by Richards function (SI:12～24) .

○: measured values; SI: site index; vertical broken line: reference point of site index in 40-years-old

の最も低い値をとったリチャーズ関数による樹高成長曲線を、地位指数曲線のガイドカーブとした。ガイドカーブは、以下の式-8で計算される。

$$H_t = 22.547 * (1 - \exp(-0.0502 * t))^{1.7358} \quad \text{式-8}$$

地位指数の推定

上記で決定したガイドカーブにおいて、40年生時の上層高

表-1 地位指数 (SI) 12~24の林分における林齢 (年) による推定上層高 (m)

Table 1 Estimated dominant height (m) between 12 to 24 site index (SI)

Stand age	SI 12	SI 14	SI 16	SI 18	SI 20	SI 22	SI 24
2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
4	0.8	0.9	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6
6	1.5	1.7	2.0	2.2	2.5	2.7	3.0
8	2.3	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	4.5
10	3.1	3.6	4.1	4.6	5.1	5.6	6.2
12	3.9	4.5	5.2	5.8	6.5	7.1	7.8
14	4.7	5.5	6.3	7.1	7.9	8.6	9.4
16	5.5	6.4	7.3	8.3	9.2	10.1	11.0
18	6.3	7.3	8.4	9.4	10.4	11.5	12.5
20	7.0	8.2	9.3	10.5	11.6	12.8	14.0
22	7.7	8.9	10.2	11.5	12.8	14.1	15.3
24	8.3	9.7	11.1	12.5	13.8	15.2	16.6
26	8.9	10.4	11.9	13.4	14.8	16.3	17.8
28	9.5	11.0	12.6	14.2	15.8	17.3	18.9
30	10.0	11.6	13.3	15.0	16.6	18.3	20.0
32	10.5	12.2	13.9	15.7	17.4	19.2	20.9
34	10.9	12.7	14.5	16.3	18.1	20.0	21.8
36	11.3	13.2	15.1	16.9	18.8	20.7	22.6
38	11.7	13.6	15.5	17.5	19.4	21.4	23.3
40	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0
42	12.3	14.4	16.4	18.5	20.5	22.6	24.6
44	12.6	14.7	16.8	18.9	21.0	23.1	25.2
46	12.9	15.0	17.1	19.3	21.4	23.6	25.7
48	13.1	15.3	17.4	19.6	21.8	24.0	26.2
50	13.3	15.5	17.7	20.0	22.2	24.4	26.6
52	13.5	15.7	18.0	20.2	22.5	24.7	27.0
54	13.7	16.0	18.2	20.5	22.8	25.1	27.3
56	13.8	16.1	18.4	20.8	23.1	25.4	27.7
58	14.0	16.3	18.6	21.0	23.3	25.6	28.0
60	14.1	16.5	18.8	21.2	23.5	25.9	28.2
62	14.2	16.6	19.0	21.4	23.7	26.1	28.5
64	14.3	16.7	19.1	21.5	23.9	26.3	28.7
66	14.4	16.9	19.3	21.7	24.1	26.5	28.9
68	14.5	17.0	19.4	21.8	24.2	26.6	29.1
70	14.6	17.1	19.5	21.9	24.4	26.8	29.2
72	14.7	17.1	19.6	22.0	24.5	26.9	29.4
74	14.8	17.2	19.7	22.1	24.6	27.1	29.5
76	14.8	17.3	19.8	22.2	24.7	27.2	29.6
78	14.9	17.4	19.8	22.3	24.8	27.3	29.8
80	14.9	17.4	19.9	22.4	24.9	27.4	29.9

は、17.5mであった。この点を基準値として、式-7, 8により地位指数曲線群を作成した。求めた地位指数12~24の範囲の地位指数曲線群を図-2に示した。また、それぞれの地位指数曲線に基づく林齢2年毎の上層高について表-1に示した。新たな地位指数曲線は、これまでに作成されたトドマツの地位指数曲線（北海道林務部 1988）に比較すると、高齢級側で成長量が低い傾向にあった。過去に地位指数曲線を推定したデータでは、60年生を超える高齢級林分が少なかったことから、新たな地位指数曲線では高齢級側でより信頼度の高い推定が可能になったと考えられる。ただし、長期観察データによる結果（石橋ほか2008）と比較しても、高齢級側で低い傾向にあることから、高齢級林分のデータにおいて、成長の良い地位の高い林分が伐採されたため、データとして残されて

いない可能性もある。

データとして利用した各林分の林齢と上層高から、各林分の地位指数を推定した。データ全体の平均地位指数は 17.50 ± 3.35 （平均 \pm 標準偏差）であった。図-3には、調査林分の地位指数の頻度分布を示した。地位指数は平均値付近にピークをとり、6~38の間に一山型で分布していた。また、地位指数12~24の間に約96%の試験地が含まれていた。

推定した地位指数について、各総合振興局および振興局を単位として平均値を求めた（表-2）。最も平均地位指数が高かったのは、日高振興局で 18.80 ± 3.26 であった。最も低かったのは根室振興局で 15.35 ± 2.79 であった。林分数の少ない後志総合振興局を除けば、これらの値は、振興局レベルの一般的な収穫予測に有効である。ただし、あくまで地域の平均で

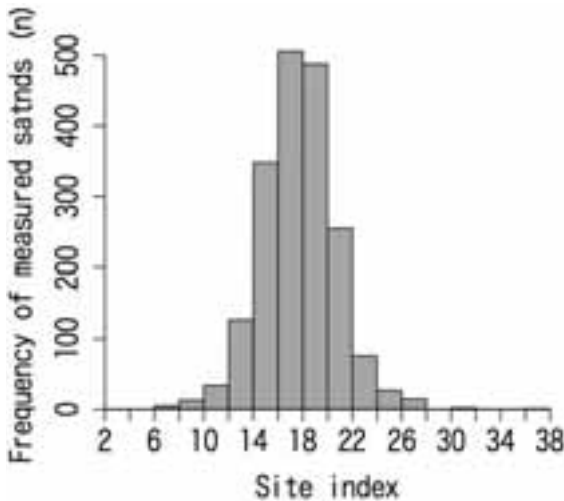


図-3 各調査林分の推定地位指数の頻度分布

Fig. 3 Histogram of estimated site index of measured stands

あり、個別の林分の地位指数には、大きな幅があることに留意が必要である。さらに市町村や地域レベルの平均値を推定するためには、より多くの地位指数を求める必要がある。地域の平均的な地位指数を視覚的に判定するためマップ化により提示することも検討している。

まとめ

地位指数曲線は、リチャーズ関数が最も当てはまりが良かった。この関数を地位指数曲線のガイドカーブとすることにより、高齢級林分の収穫予測の信頼性が高くなった。ただし、今後収穫予測の精度を向上するためには、高齢級データについて更に精査が必要である。

本研究で得られた、地位指数曲線群は、「北海道版トドマツ人工林収穫予想ソフトver1.3」(道総研林業試験場2011)に組み込まれており、トドマツ人工林の施業計画立案のツールとして一般民有林、道有林で広く活用されることが期待できる。

謝辞

本研究にあたり、林野庁、森林総合研究所、および北海道水産林務部関係各位より全道の林分データ使用に関する多大な協力と、有益な助言をいただいた。記して謝意を示します。

表-2 地位指数曲線の式から求めた各総合振興局／振興局におけるトドマツ人工林の平均地位指数

Table 2 Estimated mean site index of *Abies sachalinensis* plantation forest of sub-prefecture in Hokkaido

Code	Sub Pref.	n	mean SI	min	max	SD
1	Ishikari	75	16.51	8.69	25.60	3.27
2	Oshima	187	18.04	10.69	27.69	2.85
3	Hiyama	63	17.86	9.48	25.28	3.16
4	Shiribeshi*	29	18.63	10.53	25.14	3.66
5	Sorachi	176	18.04	9.11	26.54	2.66
6	Kamikawa	239	18.74	9.31	26.89	2.62
7	Rumoi	169	16.51	6.91	26.60	3.31
8	Souya	97	15.51	6.55	24.61	3.27
9	Okhotsk	249	17.82	8.93	30.94	2.53
10	Iburi	147	17.56	12.31	26.04	2.38
11	Hidaka	126	18.80	10.73	27.56	3.26
12	Tokachi	137	18.59	13.04	37.71	2.97
13	Kushiro	144	17.09	8.61	27.18	3.04
14	Nemuro	59	15.35	7.93	22.08	2.79

Sub Pref.: sub-prefecture; n: number of measured stand; mean SI: mean site index in each sub-prefecture; max: maximum of site index; min: minimum of site index; SD: standard deviations

*Because there are not enough data, this is for reference.

Sub Pref.: 振興局/総合振興局; n: データ数; mean SI: 各振興局における平均地位指数; max: 最大地位指数; min: 最小地位指数; SD: 標準偏差

*データ数が少ないため参考値として示す

引用文献

(地独) 北海道立総合研究機構林業試験場 (2010) 北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフトver2.04. URL: <http://www.fri.hro.or.jp/syukakuyosoku/syukakuyosoku.html> (2013年12月12日確認)

(地独) 北海道立総合研究機構林業試験場 (2011) 北海道版トドマツ人工林収穫予測ソフトver1.30. URL: <http://www.fri.hro.or.jp/syukakuyosoku/todosyukaku.html> (2013年12月12日確認)

北海道林務部監修 (1988) トドマツ人工林間伐の手引き. 103pp, 北海道林業改良普及協会, 札幌

石橋 聡・佐々木尚三・高橋正義・鷹尾 元・佐野 真 (2008) 長期観測データによるトドマツ人工林の成長予測. 日林北支論 56: 111-113.

松下啓太・近藤洋史・福里和朗 (2004) 耳川流域におけるスギ林分収穫予測表の調整 (I) - 西郷村での調整 -. 九州森林研究 57: 192-193.

Nelder, J. A.; Mead, R. (1965) A simplex algorithm for function minimization. The Computer Journal 7: 308-313.

西沢正久・真下育久 (1966) 地位指数による林地生産力の測り方. わかりやすい林業研究解説シリーズ15. 53pp, 林業科学技術振興所編, 東京

大隅真一・石川善朗 (1983) 樹木の生長解析に対する

RICHARDS生長関数の適用性について. 京都府立大学学術報告 農学 35: 49-76.

R Core Team (2013) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.R-project.org/> (2013年12月12日確認)

Summary

In Hokkaido, northern Japan, *Abies sachalinensis* stands have been matured recently, and a management system of stand levels is required. Generally, a stand growth model is based on a tree height growth model, which is depended on a site condition. The relationship between the stand growth and the tree height growth models is explained by site index curve. The site index curves of various situations are estimated by the relationship between stand ages and dominant heights. The current site index curves are estimated using the data set less than 60-years-old stands. In this study, the data set include between 60- and 89-years-old stands could be used, and the new site index curves were analyzed to adapt to old-growth-stands.

To decide the tree growth curves, four non-linear functions were used: Gompertz function, Logistic function, Mitscherlich function and Richards function. Richards function was selected for tree growth curve, and that curve was used as the guide curve of site index. Based on this guide curve, site index curves of 12, 14, 16, 18, 20, 22, and 24 were calculated. Mean site index of the data set is 17.5 ± 3.35 . The site index curves are used for the application software of yield prediction in *Abies sachalinensis* stand in Hokkaido, Japan. In future, this object should be expected to use in establishing the stand management planning, in private forests or Hokkaido government forests.

Key words

Abies sachalinensis, site index curve, tree height growth curve, Richards function