

# 道南スギ人工林の地位指数曲線の推定

滝谷 美香

## Estimation of site index curve of *Cryptomeria japonica* plantation forest in Southern Hokkaido, Japan

Mika TAKIYA

### 要旨

北海道南西部に位置する渡島半島に植栽されているスギ人工林を対象に、収穫予測を行うために必要な地位指数曲線の推定を行った。渡島半島全域にわたる431林分のデータを用い、地位指数曲線の基となる林齢と上層木の平均樹高との関係に対して、Gompertz関数、Mitscherlich関数及びChapman - Richards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Chapman - Richards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10～30の地位指数曲線群を作成した。

キーワード：スギ、道南スギ人工林、地位指数曲線、樹高成長曲線、Chapman-Richards関数

### はじめに

北海道におけるスギ人工林は、全体で面積31,859ha、蓄積は9,707千 $m^3$ である。うち一般民有林の面積は25,053ha、蓄積は8,287千 $m^3$ であり（2016年時点の全道一般民有林：北海道水産林務部 2018）、面積で78.6%、蓄積で85.4%を占める。このスギ人工林面積のうち約66%が、IX～XIII齢級（図-1）

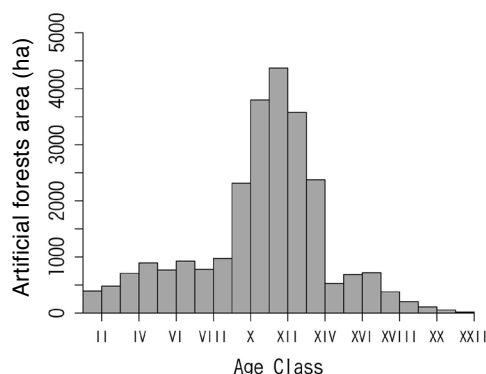


図-1 北海道におけるスギ人工林齢級別面積(2016年時点)

Figure 1 The artificial forests at each age class of *Cryptomeria*, in Hokkaido.

と間伐及び主伐利用期を迎えている。北海道においてスギは、特に南西部渡島半島を中心（以後、道南地域という）に植栽され「道南スギ」と呼ばれており、古くは江戸時代に本州から導入されたものである。このような道南スギ人工林材の有効活用を進めるためには、地域に対応した林分収穫予測を行い、適切に管理する必要がある。林分の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。その樹高成長量を示したのが地位指数曲線であり、北海道ではトドマツ、カラマツ及びアカエゾマツ人工林について、地位指数曲線が推定されている（滝谷 2014、八坂ほか 2011、津田ほか 2015）。

北海道のスギ人工林施業に関する既存研究は、1950年代に散見される（例えば、鎌田 1953、松井 1965）ものの、北海道のスギ人工林データを基に地位指数曲線の作成を試みた事例はない。そのため、道外の地位指数曲線を参考に、道南スギ人工林施業を検討しているのが実情である。

本報告では、431林分の道南スギ人工林林分データを用い、林分収穫予測に必要な道南スギ版の地位指数曲線の推定を行った。

\* 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56号 平成31年3月, Bulletin of the Hokkaido Forestry Research Institute, No. 56, March, 2019]

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（当時）が1972年～1978年にかけて実施した地位指数調査、2003年に林野庁主管で調査を行った森林吸収源データ緊急整備事業及び北海道水産林務部が2011年～2012年に実施したスギ成長量調査データの計431林分のものである。林分の平均樹高及び平均胸高直径は、それぞれ15.85 ± 5.51（平均値±標準偏差）m及び22.98 ± 8.10cmである（表-1）

表-1 解析に使用した林分データ概要

Table 1 Summary of the field measured stand structural variables

Variables		Mean	Std. Dev.	Minimum	Maximum
Dominant height	(m)	18.71	5.87	3.63	36.42
Average Tree height	(m)	15.85	5.51	2.48	33.63
DBH	(cm)	22.98	8.10	2.67	48.94

Notes: DBH = Diameter at breast height, Std.Dev. = Standard deviation

上記調査では、林分単位で0.0176ha～0.8ha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100本/haに相当する立木の平均樹高とした。上層高は、18.71 ± 5.87mであった（表-1）。林齢（年）と上層高との関係について、一般的に用いられることの多い、Gompertz関数（式-1）、Mitscherlich関数（式-2）およびChapman - Richards関数（式-3）を用い、それぞれの当てはまりを比較し、最も当てはまりのよい樹高成長曲線を決定した。

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

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

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

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。

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-4により計算した。

$$RSS = \sum_{i=1}^n (h_i - f(t_i))^2 \quad \text{式-4}$$

ただし、 $h_i$ は、 $i$ 番目の林分の実測された平均上層高、 $f(t_i)$ は林齢 $t_i$ 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成長曲線について、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（式-5）により計算した。

$$AIC = n \log(2\pi) + n \log(RSS/n) + 2p + n \quad \text{式-5}$$

ただし $\pi$ は円周率、 $\log$ は自然対数、 $p$ はパラメータ数を示す。

式-1～3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-6）により地位指数曲線群を作成した。

$$SI = H_{it} * H_{40}/H_t \quad \text{式-6}$$

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年の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 3.5.1 (R Development Core Team 2018)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

1. 成長関数への非線形回帰

非線形回帰により決定した3つの関数のパラメータを表-2に示した。また得られたパラメータから作成した樹高成長曲線を図-2に示した。いずれの樹高成長曲線も、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、

表-2 道南スギの樹高成長曲線決定のための3関数への非線形回帰結果

Table 2 Results of the nonlinear regression analysis of three functions

Funcitons	a	b	c	adjR2	AIC
Gompertz	29.836	1.689	0.035	0.6952	2241.991
Mitscherlich	32.951	0.915	0.020	0.7017	2232.677
Chapman-Richards	39.920	0.011	0.677	0.7044	2228.722

$a, b$  及び  $c$ : 各関数のパラメータ,  $adjR2$ : 自由度調整済決定係数,  $AIC$ : 赤池情報量規準

$a, b$  and  $c$ : parameters of each function,  $adjR2$ : adjusted R-square,

$AIC$ : Akaike's information criterion

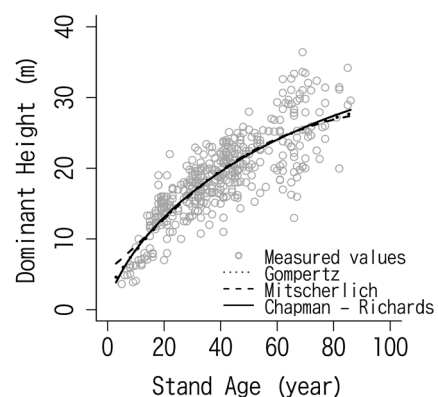


図-2 非線形回帰による林齢と上層高との関係の推定結果  
Figure 2 Relationship of dominant height and stand age of measured stands, and estimated tree height growth curves.

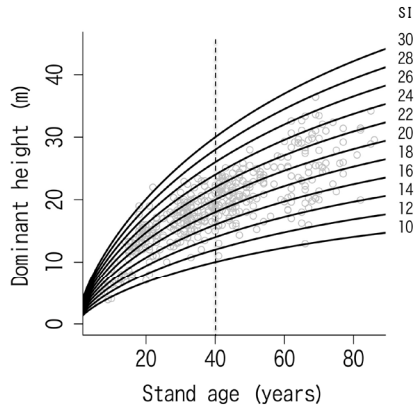


図-3 Chapman-Richards関数により算出した樹高成長曲線をガイドカーブとして描いた地位指数曲線（地位指数10~30）

灰色○：実測値；SI：地位指数；垂直破線：基準年である40年生時

Figure 3 Site index curves estimated by Chapman-Richards function (SI:10~30).

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

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、樹高成長曲線により若干の差が現れていた。

最適モデル選択のための根拠としたAICは、Gompertz関数、Mitscherlich関数及びChapman - Richards関数で、それぞれ、2241.991、2232.677及び2228.722であった。これによりAICが最も低い値をとったChapman - Richards関数による樹高成長曲線を、最適な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-7で計算される。

$$H_t = 39.920 * (1 - \exp(-0.011 * t))^{0.677} \quad \text{式-7}$$

2. 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年生時の上層高は19.50mであった。この点を基準値として、式-6, 7により地位指数曲線群を作成した。求めた地位指数10~30の範囲の地位指数曲線群を図-3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-3に示した。

表-3 地位指数 (SI) 10~30の林分における林齢 (年) による推定上層高 (m)

Appendix 1 Estimated dominant height (m) from 10 to 30 site index (SI)

Stand age	SI 10	SI 12	SI 14	SI 16	SI 18	SI 20	SI 22	SI 24	SI 26	SI 28	SI 30
6	3.1	3.7	4.4	5.0	5.6	6.2	6.8	7.5	8.1	8.7	9.3
8	3.8	4.5	5.3	6.0	6.8	7.5	8.3	9.0	9.8	10.5	11.3
10	4.3	5.2	6.1	6.9	7.8	8.7	9.5	10.4	11.3	12.1	13.0
12	4.9	5.8	6.8	7.8	8.8	9.7	10.7	11.7	12.7	13.6	14.6
14	5.4	6.4	7.5	8.6	9.7	10.7	11.8	12.9	14.0	15.0	16.1
16	5.8	7.0	8.2	9.3	10.5	11.7	12.8	14.0	15.2	16.3	17.5
18	6.3	7.5	8.8	10.0	11.3	12.6	13.8	15.1	16.3	17.6	18.8
20	6.7	8.0	9.4	10.7	12.1	13.4	14.7	16.1	17.4	18.7	20.1
22	7.1	8.5	9.9	11.3	12.8	14.2	15.6	17.0	18.4	19.9	21.3
24	7.5	9.0	10.5	12.0	13.4	14.9	16.4	17.9	19.4	20.9	22.4
26	7.8	9.4	11.0	12.5	14.1	15.7	17.2	18.8	20.4	21.9	23.5
28	8.2	9.8	11.5	13.1	14.7	16.4	18.0	19.6	21.3	22.9	24.5
30	8.5	10.2	11.9	13.6	15.3	17.0	18.7	20.4	22.1	23.8	25.5
32	8.8	10.6	12.4	14.1	15.9	17.7	19.4	21.2	23.0	24.7	26.5
34	9.1	11.0	12.8	14.6	16.5	18.3	20.1	21.9	23.8	25.6	27.4
36	9.4	11.3	13.2	15.1	17.0	18.9	20.8	22.7	24.5	26.4	28.3
38	9.7	11.7	13.6	15.6	17.5	19.4	21.4	23.3	25.3	27.2	29.2
40	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0	26.0	28.0	30.0
42	10.3	12.3	14.4	16.4	18.5	20.5	22.6	24.6	26.7	28.7	30.8
44	10.5	12.6	14.7	16.8	18.9	21.1	23.2	25.3	27.4	29.5	31.6
46	10.8	12.9	15.1	17.2	19.4	21.6	23.7	25.9	28.0	30.2	32.3
48	11.0	13.2	15.4	17.6	19.8	22.0	24.2	26.4	28.6	30.8	33.1
50	11.3	13.5	15.8	18.0	20.3	22.5	24.8	27.0	29.3	31.5	33.8
52	11.5	13.8	16.1	18.4	20.7	23.0	25.3	27.5	29.8	32.1	34.4
54	11.7	14.0	16.4	18.7	21.1	23.4	25.7	28.1	30.4	32.8	35.1
56	11.9	14.3	16.7	19.1	21.4	23.8	26.2	28.6	31.0	33.4	35.7
58	12.1	14.5	17.0	19.4	21.8	24.2	26.7	29.1	31.5	33.9	36.4
60	12.3	14.8	17.3	19.7	22.2	24.6	27.1	29.6	32.0	34.5	37.0
62	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	30.0	32.5	35.0	37.6
64	12.7	15.2	17.8	20.3	22.9	25.4	28.0	30.5	33.0	35.6	38.1
66	12.9	15.5	18.0	20.6	23.2	25.8	28.4	30.9	33.5	36.1	38.7
68	13.1	15.7	18.3	20.9	23.5	26.1	28.8	31.4	34.0	36.6	39.2
70	13.2	15.9	18.5	21.2	23.8	26.5	29.1	31.8	34.4	37.1	39.7
72	13.4	16.1	18.8	21.5	24.2	26.8	29.5	32.2	34.9	37.6	40.3
74	13.6	16.3	19.0	21.7	24.4	27.2	29.9	32.6	35.3	38.0	40.7
76	13.7	16.5	19.2	22.0	24.7	27.5	30.2	33.0	35.7	38.5	41.2
78	13.9	16.7	19.5	22.2	25.0	27.8	30.6	33.4	36.1	38.9	41.7
80	14.1	16.9	19.7	22.5	25.3	28.1	30.9	33.7	36.5	39.4	42.2
82	14.2	17.0	19.9	22.7	25.6	28.4	31.2	34.1	36.9	39.8	42.6
84	14.3	17.2	20.1	23.0	25.8	28.7	31.6	34.4	37.3	40.2	43.0
86	14.5	17.4	20.3	23.2	26.1	29.0	31.9	34.8	37.7	40.6	43.5

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。推定されたデータ全体の平均地位指数は $19.43 \pm 3.37$  (平均 $\pm$ 標準偏差)であった。図-4には、上記推定地位指数の頻度分布を示した。地位指数は平均値付近(18~22)にピークをとり、8~32の間に一山型で分布していた。

推定した地位指数について、2000年以前の行政区分による

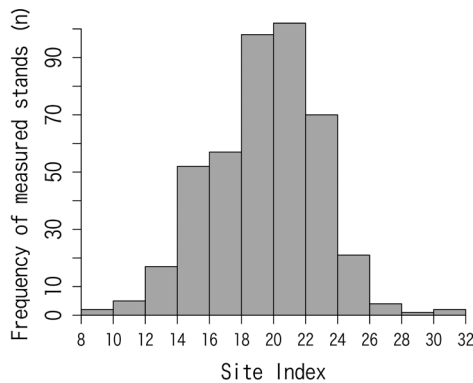


図-4 Chapman-Richards関数による樹高成長曲線をガイドカーブとして推定された、各調査林分の地位指数頻度分布

Figure 4 Histogram of estimated site index of measured stands by the tree growth curve model.

表-4 調査林分数10点以上の市町村における地位指数の平均値

Table 4 Site index mean values of each city which has over 10 stands data

旧市町村*	現市町村	n	平均値
松前		29	19.2
福島		29	18.6
知内		18	18.7
木古内		44	21.0
上磯	北斗	27	18.9
大野	北斗	11	19.8
七飯		11	19.7
恵山	函館	13	19.3
南茅部	函館	14	19.2
八雲		31	19.4
函館		20	18.7
江差		20	18.4
上ノ国		47	20.6
厚沢部		15	21.4
乙部		13	21.4
熊石	八雲	13	20.7
大成	せたな	17	19.1
奥尻		13	15.6

\* 2000年以前の行政区分による市町村

市町村を単位として平均値を求めた。いわゆる「平成の大合併」以前の行政区分を単位としたのは、地域特性をより細かく反映するためである。調査林分数が10点以上ある市町村で比較した場合、平均地位指数が高かったのは、乙部町21.4 (n = 13), 厚沢部町21.4 (n = 15), 木古内町21.0 (n = 44)及び八雲町旧熊石町地域20.7 (n = 13)で、西部に多い傾向にあった(表-4)。なお、戸井、樞法華、鹿部、砂原、森、長万部、瀬棚、北檜山及び今金については、林分数が10未満であったため、平均値の計算はしていない。これら各市町村の数値は、あくまで地域の平均であり、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。

### 3. 他県のガイドカーブとの比較

本論文による道南スギの地位指数曲線と、道南地域に近い青森県南部スギ及び津軽スギのそれぞれ地位級3(40年生時の上層高がそれぞれ21.1m, 20.3m)の地位指数曲線(青森県林業試験場2009)とを比較した(図-5)。青森県津軽スギの地位指数曲線により、本報告で使用した林分データの林齢から樹高を推定した場合、平均平方二乗誤差(RMSE)は3.380であった。同様に青森県南部スギにより計算した場合には3.393であった。これらに対し、式-7によって林分から樹高を推定した場合、RMSEは3.181となり、道外の地位指数曲線を使用する場合よりも樹高の予測精度は改善されていた。本報告で計算された地位指数曲線を使用することにより、道南スギ人工林施業における収穫予測精度を向上することが可能となった。

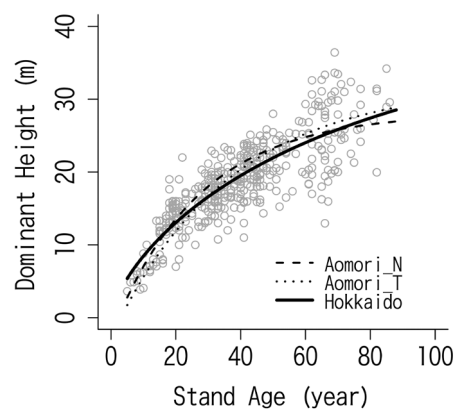


図-5 青森県において推定されているスギ人工林の樹高成長曲線と道南スギとの比較

Aomori\_N: 青森県南部スギ, Aomori\_T: 青森県津軽スギ, Hokkaido: 道南スギ

Figure 5 Estimated tree growth curves in Aomori prefecture and that in Hokkaido.

### 4. 地位指数曲線群の活用

本研究で得られた、地位指数曲線群は、「道南スギ林収穫予測ソフトver1.1」(地方独立行政法人北海道立総合研究機構

林業試験場2015)に組み込まれており、道南スギ人工林の施業計画立案のツールとして一般民有林、道有林等で活用されることが期待できる。

## まとめ

道南スギ地位指数曲線は、Chapman - Richards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して、道南スギの各市町村レベルの地位指数を推定したところ、北部でやや成長量が低く、西部で高い傾向が見られた。

青森県で作成された地位指数曲線により、道南スギの地位を推定した場合と比較すると、本報告により作成したもので推定した場合には、推定精度が向上していた。

## 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。また、所属する林業試験場職員には、日頃より議論を通じ重要な助言をいただいた。記して謝意を示します。

## 引用文献

- 青森県林業試験場 (2009) 青森県林分密度管理 (エクセルシート)  
URL: <http://www.aomori-itc.or.jp/index.php?id=5132> (2018年11月17日確認)
- 地方独立行政法人北海道立総合研究機構林業試験場 (2015) 道南スギ収穫予測ソフトver1.1.  
URL: <https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fri/syakakuyosoku/sugisyakaku.html> (2018年11月17日確認)
- 北海道水産林務部 (2018) 森林計画関係資料 林種・樹種・林相別資源構成表  
URL: <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srk/OPD.htm> (2018年11月17日確認)
- 鎌田藤一郎 (1953) 北海道におけるスギ造林成績について 第II報. 第62回林学会講演集 110-112
- 松井善喜 (1965) 北海道における造林の事業と推移 北海道の森林の取扱いに関する研究I. 林業試験場研究報告 175:1-143.
- 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
- R Development Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

(2018年11月17日確認)

- 滝谷美香 (2014) トドマツ人工林の地位指数曲線の改訂. 北海道林業試験場研究報告 51: 7-11
- 津田高明・大野泰之・山田健四・滝谷美香 (2015) 高齢林分に対応したアカエゾマツ人工林の成長予測. 北森研 63: 31-32
- 八坂通泰・滝谷美香・山田健四 (2011) システム収穫表「北海道版カラマツ人工林収穫予測ソフト」の開発. 北海道林業試験場研究報告 48: 65-74

## Summary

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. In this study, 431 stand data set was used, and the site index curves were analyzed to adapt to *Cryptomeria japonica* stands in Hokkaido.

To decide the tree growth curves, three non-linear functions were used: Gompertz function, Mitscherlich function and Chapman-Richards function. Chapman-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 from 10 to 30 in every second SI were calculated.

## Key words

*Cryptomeria japonica* plantations in southern Hokkaido, site index curve, tree height growth curve, Chapman-Richards function