

秋田地方のスギ人工林における林分材積成長量の経年推移

西園朋広^{*1}・田中邦宏²・粟屋善雄³・大石康彦⁴・林 雅秀¹・横田康裕⁵
 天野智将¹・久保山裕史³・八巻一成¹・古井戸宏通⁶

西園朋広・田中邦宏・粟屋善雄・大石康彦・林 雅秀・横田康裕・天野智将・久保山裕史・八巻一成・古井戸宏通：秋田地方のスギ人工林における林分材積成長量の経年推移 日林誌 90: 232~240, 2008 秋田地方のスギ人工林に設置された29の試験区における長期継続調査データを分析し、林分成長量の経年変化を調べた。林分材積総平均純成長量は林齢とともに増加した後に、80~90年で減少に転じるか、もしくは一定の値を保っていた。林分材積総平均粗成長量が最大となる林齢は純成長のそれよりも高齢であった。上層樹高総平均成長量は、ほとんどの試験区で調査開始時点(林齢27~39年)よりも前に最大に達しており、林齢とともに減少した。断面積合計総平均純成長量は林齢とともに増加した後に、40~80年で減少に転じていた。以上より、次の結論を得た。1) 密度管理や地位の違いにかかわらず、林齢60年生以上まで林分材積総平均成長量は増加する。2) 間伐等の実施によって、被圧や災害による枯死量を少なくできれば、平均成長量が最大に達する林齢が高くなる。3) 平均成長量が最大に達する林齢は上層樹高、断面積合計、林分材積の順に高齢に推移する。
 キーワード：スギ高齢人工林、地位、林分胸高形数、林分材積総平均純成長量、林分材積総平均粗成長量

T. Nishizono, K. Tanaka, Y. Awaya, Y. Oishi, M. Hayashi, Y. Yokota, M. Amano, H. Kuboyama, K. Yamaki, and H. Furuido: Age-related Changes in Stand Volume Growth of *Cryptomeria japonica* Plantations in Akita District, Northeastern Japan. J. Jpn. For. Soc. 90: 232~240, 2008 We analyzed long-term monitoring data on old-aged plantations of sugi (*Cryptomeria japonica*) in Akita District to examine age-related changes in stand volume growth. Mean annual net volume increment increased with increasing age, and then decreased after an age of 80~90 years, or sustained a constant level. The culmination age of mean annual gross volume increment was greater than that of the mean annual net volume increment. Mean annual increment in dominant tree height peaked before the first recorded measurement (plantation age 27~39 years), and decreased with increasing age. Mean annual net increment in stand basal area increased with increasing age, and then decreased after an age of 40~80 years. Our results suggest that sugi stands in Akita District seldom reach the culmination of mean annual volume increment until an age of 60 years, regardless of site productivity and stand density management; a thinning regime may extend the culmination age by reducing mortality due to suppression and disturbance. Additionally, dominant tree height growth peaks early, followed by basal area growth and stand volume growth.

Key words: mean annual net increment, mean annual gross increment, old-aged plantation of *Cryptomeria japonica*, site productivity, stand form factor

I. はじめに

林分材積の成長量は、林齢とともに増加し、最大に達した後に徐々に減退していくと考えられる(Kira and Shidei, 1967; Ryan *et al.*, 1997)。林分材積の平均成長量が具体的にいつの時点で最大に達するのかということは、伐期の設定に関連するので、林業経営において最も基礎的な情報の一つである。

平均成長量が最大となる時期を明らかにするためには、

固定試験地を設定して継続的な調査を行うことが最も確実な方法である。しかし、長期間にわたってデータを収集し続けることは多くの困難を伴うので、高齢級を含む実測データに基づいて成長減退の時期を検討した報告(細田, 1995; 大住ら, 2000)は、わが国の主要樹種であるスギについてさえ意外に少ない。細田(1995)は紀州地方の高齢スギ人工林における長期モニタリングデータを解析し、林分材積の平均成長量が最大となる時期が、収穫表が予想するよりも20年遅延したことを報告した。また、大住ら

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: nishizo@ffpri.affrc.go.jp

¹ (独)森林総合研究所東北支所 (020-0123 盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25)

Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 92-25 Nabeyashiki, Shimo-Kuriyagawa, Morioka 020-0123, Japan.

² (独)森林総合研究所関西支所 (612-0855 京都市伏見区桃山町永井久太郎 68)

Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, 68 Nagaikyutaro, Momoyama, Fushimi, Kyoto 612-0855, Japan.

³ (独)森林総合研究所 (305-8687 つくば市松の里 1)

Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba 305-8687, Japan.

⁴ (独)森林総合研究所多摩森林科学園 (193-0843 八王子市廿里町 1833-81)

Tama Forest Science Garden, Forestry and Forest Products Research Institute, 1833-81 Todorii, Hachioji 193-0843, Japan.

⁵ (独)国際農林水産業研究センター (305-8686 つくば市大わし 1-1)

Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 1-1 Ohwashi, Tsukuba 305-8686, Japan.

⁶ 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)

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

(2007年2月26日受付; 2008年3月21日受理)

(2000) は秋田地方の高齢スギ人工林での継続調査データを分析し、林分材積の成長傾向が収穫表の予測と一致し、林分材積の平均成長量の明瞭な低下が認められないことを報告した。上記の報告はいずれも、スギ人工林の平均成長量が長期にわたって最大値に達しないことを示している。しかし、前者は対象とした試験区の数少なく、後者は試験区の多くが地位の良い林分であることから、平均成長量の増加が長期的に持続することがより普遍的な傾向であるかどうかについてさらに検討を進める必要がある。

ところで、寺崎ら (1964) は秋田地方に設定されたスギ人工林の多数の試験地のモニタリングデータを用いて、若齢から壮齢にかけての林分成長の傾向を分析し、ほとんどの試験地が平均成長量最大の時期に達していないことを示した。この報告で用いられた試験地のうちの半数は現在でも測定が継続されており、その林齢は90年以上に達している。また、これらの試験地の地位は中程度を中心に分布しており、秋田地方で検討されなかった地位を対象に林分成長の推移を分析することができる。本報告では、これらの試験地の長期継続調査データを解析し、秋田地方のスギ人工林における林分材積成長量の長期的な推移を調べた。本研究の焦点は、1) 林分材積の平均成長量が長期にわたり増加し続けるかどうかを明らかにすること、2) 林分における伸長成長・肥大成長の推移を明らかにし、林分材積成長との関連について考察することである。

II. 資料と方法

1. 対象地と調査方法

本研究では、旧秋田管林局管内（秋田県と山形県の国有林）のスギ人工林収穫試験地のうち10試験地における29試験区を対象とした（図-1および表-1）。1934年から1940年にかけて、各試験地において、約0.2haの三つの試験区が設定され、試験地内の胸高直径7.0cm以上の個体について胸高帯と立木番号を付与し、胸高直径と樹高が測定された。以後、壮齢期（平均すると67.9年生）までは5年、高齢期においては約10年の間隔で胸高直径と樹高が測定された。ただし、戦争などの影響を受け、必ずしもこの間隔は厳密には守られていない。また、樹高につ

いては標準木のみを測定したことがある。最新の調査は1998年から2006年までに実行され、各林分の林齢は88年から104年に達している。各試験地では寺崎式B種間伐を主体とした間伐が実施されてきたが、男鹿山試験地では設定以来間伐が実施されていない。対象とした試験地の概要を表-1に示す。調査方法ならびに各試験地に関する詳細は寺崎ら (1964) を参照されたい。

なお、本研究で取り上げた10の試験地以外にも秋田地方で調査を継続中のスギ人工林収穫試験地が存在するが、立木番号の残存状態が悪く、多くの個体において追跡調査ができていなかったため、間伐量と枯損量を把握することができなかった。そのため、本研究の対象からは除外した。

2. 解析方法

1) 林分構成値

測定時ごとに、林分材積、平均樹高、上層樹高、胸高断面積合計（以下、断面積合計と記す）、本数密度を求めた。林分材積については、胸高直径と樹高から材積表（林野庁、1970）を利用して個体ごとの材積を算出し、それを試験区の全個体について積算することによって求めた。樹高が測定されていない個体については、樹高曲線から推定した。平均樹高は次の調査までに間伐されなかった個体の平均値

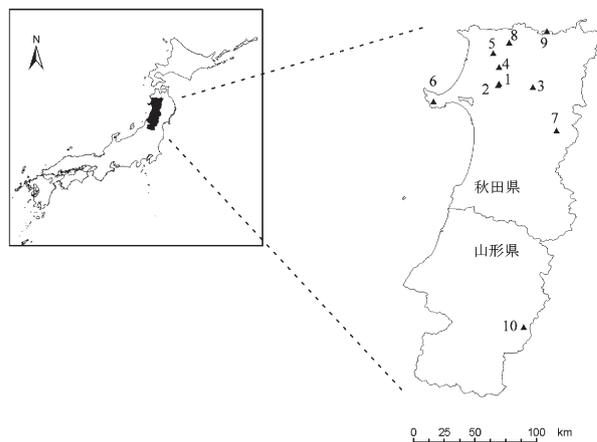


図-1. 試験地の位置
図中の番号は表-1と合致している。

表-1. 試験地の概要

No.	試験地	試験区数	林齢		標高 (m)	年平均気温* (°C)	月平均気温*		年間降水量* (mm)	最深積雪* (m)
			調査開始年 (yr)	最新調査年 (yr)			1月 (°C)	7月 (°C)		
1	岩川	3	35	93	176	9.1	-3.1	21.4	1732.6	0.72
2	上大内沢	3	27	88	143	9.2	-2.7	21.4	1712.3	0.72
3	桐内沢	3	39	101	470	7.9	-4.0	20.2	2134.3	2.14
4	仁鮎小掛山	3	32	104	230	8.6	-3.2	20.7	1635.1	0.84
5	大開	3	27	90	159	9.6	-2.0	21.6	1756.2	0.74
6	男鹿山**	3	31	96	334	9.1	-1.0	19.2	1629.6	0.27
7	大沢	3	31	94	297	8.6	-3.5	20.9	2171.0	1.05
8	大座崩	2	33	96	205	8.7	-3.0	20.7	2066.4	0.96
9	下内沢	3	37	102	331	7.7	-4.3	20.0	1889.2	0.79
10	戸沢山	3	35	100	449	9.3	-2.2	20.7	1283.7	0.44

* 気象データはメッシュ気候値（気象庁，2002）より算出した。** 無間伐の試験地を示す。

として算出し、収穫表との比較から地位を把握するのに用いた。上層樹高は上位樹高 250 本/ha の平均値として算出し、本数密度が 250 本/ha 未満の場合は、全個体の平均値として算出した。上層樹高と断面積合計は、林分における伸長成長と肥大成長の推移を把握するために用いた。伸長成長の指標として、平均樹高ではなく上層樹高を用いたのは、下層間伐の前後で個体の樹高に変化がないにも関わらず平均樹高が増加するので、林分の発達過程を記述するのに不十分であると考えたためである。

2) 成長量の算出

総成長量、総平均成長量および定期平均成長量を用いて、林分材積、胸高断面積合計および上層樹高の成長量を記述した。ある林齢 t における量を $Z(t)$ とすると、林齢 t における総成長量 $G(t)$ 、総平均成長量 $G_{\text{MAI}}(t)$ 、林齢 t から n 年間の定期平均成長量 $G_{\text{PAI}}(t, n)$ は以下のようにあらわすことができる (大隈ら, 1971)。

$$G(t) = Z(t) \quad (1)$$

$$G_{\text{MAI}}(t) = G(t)/t \quad (2)$$

$$G_{\text{PAI}}(t, n) = (G(t+n) - G(t))/n \quad (3)$$

ある林齢 t までの間伐収穫の合計 $Y(t)$ と林齢 t における現存量 $S(t)$ の和 $Y(t) + S(t)$ を $Z(t)$ に代入することによって、林分材積総純成長量、林分材積総平均純成長量、林分材積定期平均純成長量を (1) 式～(3) 式から算出した。 $Y(t) + S(t)$ に林齢 t までの枯損量の合計 $M(t)$ を加えた量 $Y(t) + S(t) + M(t)$ を $Z(t)$ に代入することによって、林分材積総粗成長量、林分材積総平均粗成長量、林分材積定期平均粗成長量を (1)～(3) 式から算出した。断面積合計についても、林分材積と同じ手順で断面積合計総純成長量や断面積合計総粗成長量などを算出した。上層樹高については、ある林齢の上層樹高 $H(t)$ をそのまま $Z(t)$ に代入することによって、上層樹高総成長量、上層樹高総平均成長量、上層樹高定期平均成長量を (1)～(3) 式から算出した。したがって、算出した成長量は、林分材積と断面積合計がそれぞれ 6 種類、上層樹高が 3 種類である。試験地設定前の間伐量や枯死量については無視した。

なお、既存の報告において、単に「総収穫量」、「平均成長量 (総平均成長量)」および「連年成長量」と記述されている場合は、このようにして算出した林分材積総純成長量、林分材積総平均純成長量および林分材積定期平均純成長量のことを意味することが多い (山田・村松, 1963)。本研究で既存の報告を引用する場合には、平均成長量と連年成長量を林分材積平均純成長量と林分材積定期平均純成長量とみなした。

3) 最大成長量を示す林齢の推定

各林分構成値の成長量が持続するかどうか明らかにするために、各林分構成値の総平均成長量と定期平均成長量の最大値を示す林齢 (以下、ピーク林齢と記す) を求めた。本研究のデータは 5 年あるいは 10 年以上の測定間隔が空いた調査から得られたものであり、さらに、試験地に

よって調査が行われた林齢が異なっていたので、調査データから、直接的に、適切なピーク林齢を推定することは困難であった。そのため、まず、各林分構成値の総成長量のデータに平滑化スプラインによる平滑化処理を行い (竹澤, 2001)、調査期間中の毎年における総成長量を推定した。次に、推定した総成長量に基づいて、(2) 式と (3) 式より、毎年における総平均成長量と定期平均成長量を算出し、全調査期間中で最大の値を示す林齢をピークの林齢とした。

4) 林分胸高形数の算出

形数法を応用すると、形状成長・伸長成長・肥大成長と材積成長との関係を統一的に理解できることが知られている (堀田, 1928) (IV. 2. で詳述する)。本研究では、林分における伸長成長・肥大成長の推移と、林分材積成長の推移との関連について考察することを目的の一つとしているので、林分胸高形数を算出し、その経年推移を調べた。林分胸高形数 a は、林分材積総成長量 V 、断面積合計総成長量 B 、上層樹高 H から、 $a = V/(BH)$ として求めた。

5) 既存資料との比較

成長傾向を比較検討し、地位を把握するための参考資料として、秋田地方すぎ林分収穫表 (秋田営林局, 1949) (以下、収穫表と記す) を用いた。平均樹高、林分材積総成長量、林分材積総平均成長量、林分材積定期平均成長量を収穫表の地位級別のそれらと比較できるように図示した。

林分密度の推移を把握するために、秋田地方国有林すぎ林分密度管理図 (林野庁, 1980) (以下、密度管理図と記す) を用いた。林分密度と林分材積との関係を密度管理図のそれと比較できるように図示した。

6) 統計解析

定期平均成長量は、総成長量や総平均成長量と比べて、測定誤差の影響を強く受ける。そのため、調査期間ごとの変動が大きく、成長量の推移傾向をグラフから視覚的に把握することが難しかった。このことを考慮して、すべての試験区のデータを用いて、調査期間の期首と期末の平均林齢と各林分構成値の定期平均成長量との関係に平滑化スプライン曲線を回帰した (Wang and Ke, 2004)。回帰曲線によって、各林分構成値における定期平均成長量の経時変化の全般的な推移傾向を把握した。

林分材積総平均純成長量と林分材積総平均粗成長量のピーク林齢の平均値を t 検定で比較した。

上層樹高総平均成長量、断面積合計総平均純成長量、林分材積総平均純成長量のピーク林齢の平均値をボンフェローニの多重比較検定で比較した。上層樹高総平均成長量、断面積合計総平均粗成長量、林分材積総平均粗成長量のピーク林齢の平均値についてもボンフェローニの多重比較検定で比較した。定期平均成長量のピーク林齢についても同様に比較した。

なお、いくつかの試験区については、調査開始時点あるいは最終調査時点で最大値を示しており、実際のピーク林齢を特定できなかった。その場合には、調査開始時点あるいは最終調査時点の林齢をピーク林齢とみなして平均値を

算出した。

林分胸高形数の推移傾向を把握するために、すべての試験区のデータを用いて、林齢と林分胸高形数の関係に一次式を回帰した。

III. 結 果

1. 地位の把握

29 試験区における平均樹高の推移は収穫表の地位上と地位下との間に分布していた (図-2)。林分材積総純成長量は林齢 100 年で $800\sim 1,900\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ であった (図-3(a))。この範囲は収穫表の地位上と地位下との間に位置していた。このように 29 試験区は、地位中を中心として比較的幅の広い地位の林分が含まれていた。なお、林齢 100 年で最も成長の良かった試験区では、林齢 80 年頃以降、林分材積総純成長量の増加がわずかであったが、これは、台風の倒木被害によるものであった。林分材積総粗成長量の推移の大きな傾向は、林分材積総純成長量と一致していた (図-3(b))。

2. 林分材積成長量の推移

林分材積総平均純成長量と林分材積総平均粗成長量は、林齢とともに増加した後に、減少に転じるか、もしくは一定の値を保ち、推移の大きな傾向は両者一致していた (図-4(a), (b))。

林分材積定期平均純成長量は、調査期間ごとに大きく変動したが、全般的な傾向としては、50 年程度で最大値に

達し、その後、林齢とともに減少していた (図-5(a))。林分材積定期平均粗成長量の推移の大きな傾向は林分材積定期平均純成長量のそれと一致していた (図-5(b))。

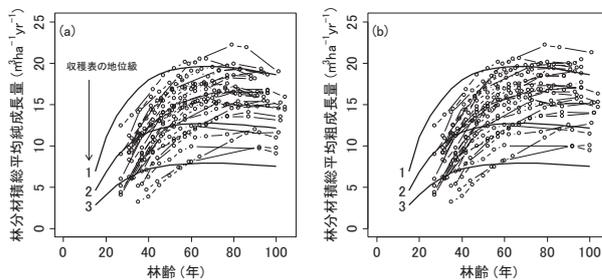


図-4. 林分材積総平均純成長量 (a) と林分材積総平均粗成長量 (b) の推移

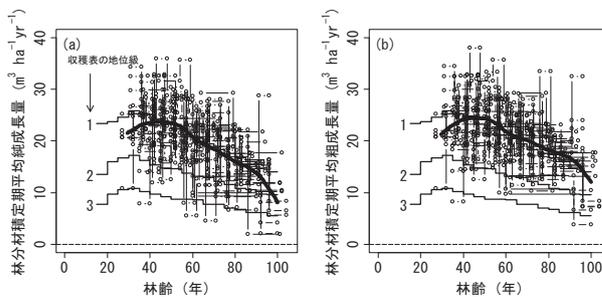


図-5. 林分材積定期平均純成長量 (a) と林分材積定期平均粗成長量 (b) の推移

図中の太線は平滑化スプラインによる推定値を示す。

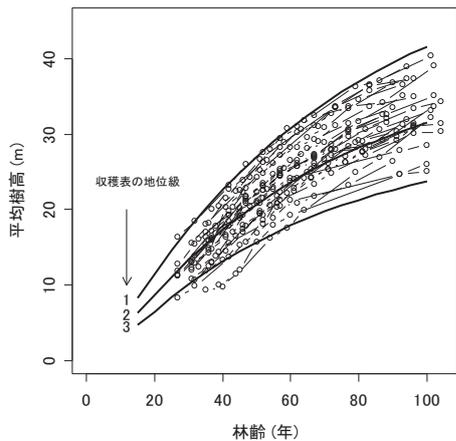


図-2. 平均樹高の推移

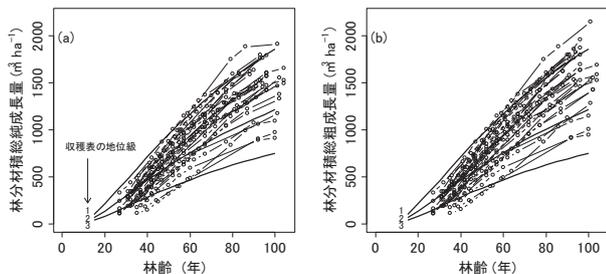


図-3. 林分材積総純成長量 (a) と林分材積総粗成長量 (b) の推移

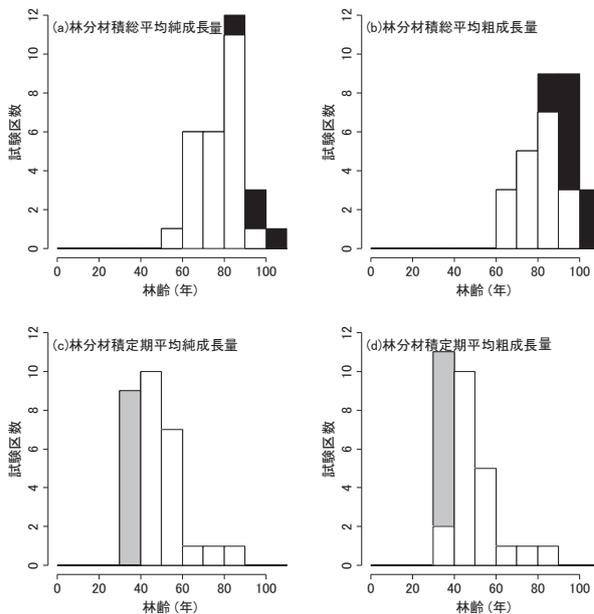


図-6. 林分材積総平均純成長量 (a)、林分材積総平均粗成長量 (b)、林分材積定期平均純成長量 (c) および林分材積定期平均粗成長量 (d) におけるピーク林齢の頻度分布

図中の灰色の部分と黒い部分は、それぞれ、調査開始時と最終調査時に最大値を持つ試験区を示す。

林分材積総平均純成長量の最大値を示す林齢は、ひと山型の分布を示した(図-6(a))。80~90年で最大となる試験区が多く、その平均林齢は80.4年(95%信頼区間76.5~84.4年)であった。四つの試験区では最終調査時点で最大値を示した。林分材積総平均粗成長量の最大値を示す林齢は、ひと山型の分布を示した(図-6(b))。80~100年で最大となる試験区が多く、その平均林齢は86.1年(81.9~90.3年)であった。11の試験区では最終調査時点で最大値を示した。林分材積総平均粗成長量の最大値を示す林齢は、林分材積総平均純成長量のそれと比べて高齢であった(*t*-test, *p* = 0.007)。

林分材積定期平均純成長量と林分材積定期平均粗成長量の最大値を示す林齢は、ともに30~50年の試験区が多く(図-6(c), (d)), その平均林齢はそれぞれ46.7年(41.9~51.5年)と45.7年(41.1~50.4年)であった。九つの試験区では調査開始時点で最大値を示した。

3. 上層樹高成長量と断面積合計成長量の推移

上層樹高総平均成長量は、調査開始時点よりも前に最大に達するようで、林齢とともに減少した(図-7(a))。上層樹高定期平均成長量は調査期間ごとに大きく変動したが、全般的な傾向としては、林齢とともに減少した(図-7(b))。一つの試験区で、上層樹高定期平均成長量が負の値を示した(図-7(b))。前後の測定値の推移から判断すると、樹高測定時の誤差の影響で上層樹高定期平均成長量が負になったと考えられる。

断面積合計総平均純成長量と断面積合計総平均粗成長量

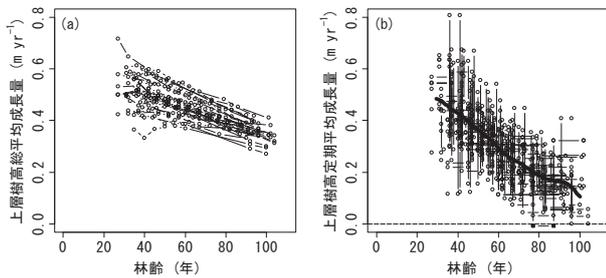


図-7. 上層樹高総平均成長量 (a) と上層樹高定期平均成長量 (b) の推移

図中の太線は平滑化スプラインによる推定値を示す。■はマイナス成長を示す。

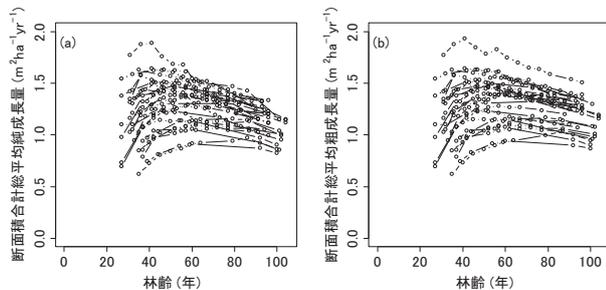


図-8. 断面積合計総平均純成長量 (a) と断面積合計総平均粗成長量の推移

は林齢とともに増加した後に、減少に転じており、推移の大きな傾向は両者で一致していた(図-8(a), (b))。

断面積合計定期平均純成長量は調査期間ごとに大きく変動したが、全般的な傾向としては、林齢とともに減少していた(図-9(a))。断面積合計定期平均粗成長量の推移の大きな傾向は断面積合計定期平均純成長量のそれと一致していた(図-9(b))。二つの試験区で断面積合計定期平均純成長量が負の値を示した(図-9(a))。56~61年, 66~71年および76~81年の測定期間で負の値を示したのは、同一の試験区であり、無間伐区であった。また、86~101年の測定期間で負の値を示した試験区では、該当期間中に台風の倒木被害がみられた。よって、自己間引きや風倒による枯死木の発生の影響で断面積合計定期平均純成長量が負になったと考えられる。

上層樹高総平均成長量の最大値を示す林齢は27年から53年の間に分布していた(図-10(a))。30~40年で最大となる試験区が多く、その平均林齢は35.9年(33.8~38.0年)であった。多くの試験区で第一回目の調査時点で最大値を示した。上層樹高定期平均成長量の最大値を示す林齢は、28年から71年の間に分布していた(図-10(b))。30~40年で最大となる試験区が多く、その平均林齢は38.9年(35.0~42.7年)であった。多くの試験区で第一回目の調査時点で最大値を示した。二つの試験区では他の試験区と比較して、著しく高い林齢(68年と71年)で最大値を示した。定期平均成長量は測定誤差の影響を強く受けることや、これらの試験区の上層樹高の推移から判断すると、樹高の測

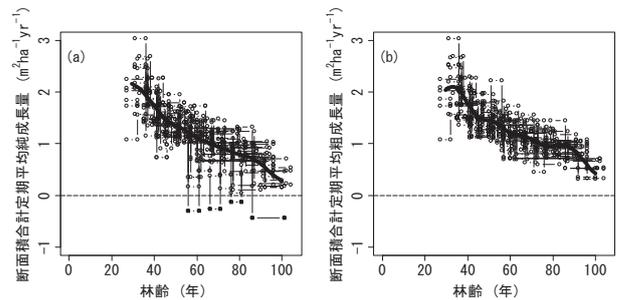


図-9. 断面積合計定期平均純成長量 (a) と断面積合計定期平均粗成長量 (b) の推移

図中の太線は平滑化スプラインによる推定値を示す。■はマイナス成長を示す。

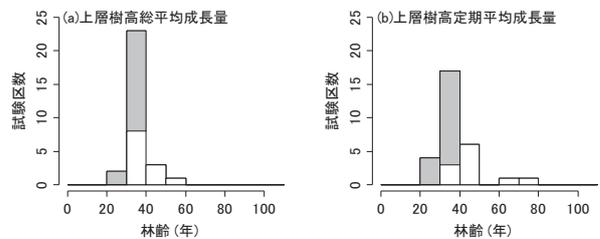


図-10. 上層樹高総平均成長量 (a), 上層樹高定期平均成長量 (b) におけるピーク林齢の頻度分布

図中の灰色の部分は調査開始時に最大値を持つ試験区を示す。

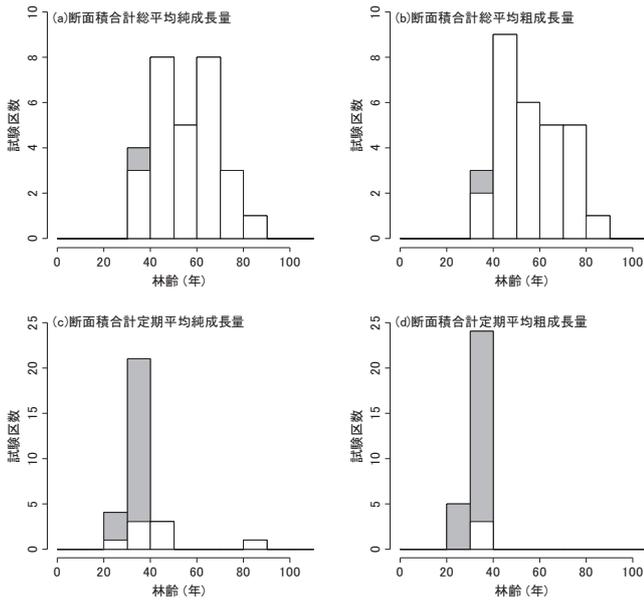


図-11. 断面積合計総平均純成長量 (a), 断面積合計総平均粗成長量 (b), 断面積合計定期平均純成長量 (c) および断面積合計定期平均粗成長量 (d) におけるピーク林齢の頻度分布

図中の灰色の部分は調査開始時に最大値を持つ試験区を示す。

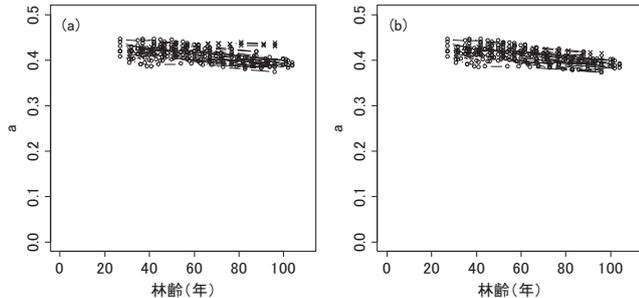


図-12. 純成長量 (a) と粗成長量 (b) における林分胸高係数の推移

図中の×は無間伐の試験区を示す。

定誤差の影響によって、これらの試験区では最大値を示す林齢が過大になった可能性が高い。

断面積合計総平均純成長量と断面積合計総平均粗成長量の最大値を示す林齢は、35年から86年の間および35年から87年の間に分布していた(図-11(a), (b))。その平均林齢は、それぞれ、55.4年(50.3~60.6年)と55.8年(50.7~60.8年)であった。断面積合計定期平均純成長量と断面積合計定期平均粗成長量の最大値を示す林齢は、ほとんどの試験区で40年未満であり(図-11(c), (d))、その平均林齢は36.7年(33.0~40.4年)と34.4年(32.9~35.9年)であった。多くの試験区で第一回目の調査時点で最大値を示した。

上層樹高総平均成長量, 断面積合計総平均純成長量, 林

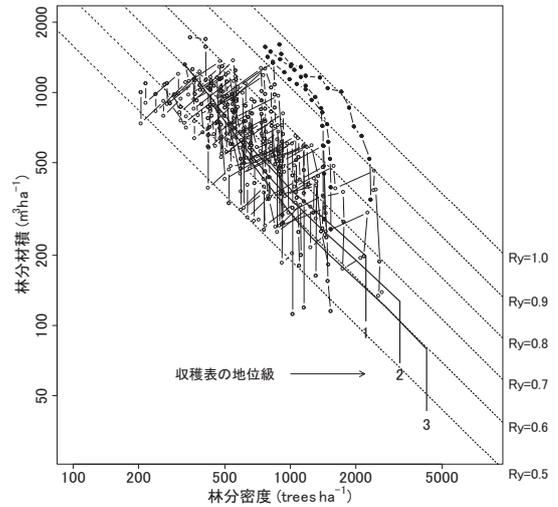


図-13. 林分密度管理図上の推移

図中の黒丸は無間伐の試験区を示す。

分材積総平均純成長量が最大を示す林齢の平均値は、上層樹高く断面積合計<林分材積の順に高齢に推移した(Bonferroni test, $p < 0.05$)。粗成長量を対象とした場合でも同様の傾向が認められた。

上層樹高定期平均成長量, 断面積合計定期平均純成長量, 林分材積定期平均純成長量が最大を示す林齢の平均値には、上層樹高<林分材積, 断面積合計<林分材積なる関係が認められ(Bonferroni test, $p < 0.05$)、上層樹高と断面積合計については差が認められなかった(Bonferroni test, $p > 0.05$)。粗成長量を対象とした場合でも同様の傾向が認められた。

4. 林分胸高形数の推移

林分材積総純成長量から求めた林分胸高係数 a_{net} は林齢 t とともに直線的な推移を示し、両者の間には、無間伐林で $a_{net} = 0.000309t + 0.408591$, 間伐林で $a_{net} = -0.000453t + 0.437629$ なる関係が認められた ($p = 0.000$; 図-12(a))。つまり, a_{net} は無間伐林で林齢とともに増加し, 間伐林で林齢とともに減少していた。しかし, その変化量は小さかった。林分材積総粗成長量から求めた林分胸高係数 a_{gross} は林齢とともに直線的な推移を示し、両者の間には、無間伐林で $a_{gross} = -0.000487t + 0.438244$, 間伐林で $a_{gross} = -0.000173t + 0.426304$ なる関係が認められた ($p = 0.000$; 図-12(b))。つまり, a_{net} は無間伐林, 間伐林ともに林齢とともに減少していた。しかし, その変化量は小さかった。

5. 密度管理の推移

無間伐の3試験区は、収量比数0.9~1.0の間で推移していた(図-13)。間伐の実施された試験区は、収量比数0.5~0.8の間で管理されており、収穫表で示された推移を中心に分布し、収穫表の密度管理と似ていた(図-13)。

IV. 考 察

1. 林分材積成長量の経年推移と持続性

いずれの林分構成値においても、定期平均成長量は調査期間ごとに大きく変動した(図-5, 7(b), 9)。断面積合計(図-9)と比べて、上層樹高(図-5)および林分材積(図-7(b))における定期平均成長量の変動が大きかったことや上層樹高のピーク林齢に異常値がみられたこと(図-10(b))から、とくに樹高の測定誤差が大きく、これが材積に伝播したと考えられる。したがって、本研究の結果には、おもに樹高測定に起因する少なからぬ測定誤差が含まれている。以下では、このことに留意しながら、多くの試験区で全般的に認められる成長傾向について考察を加える。

秋田地方のスギ人工林の林分材積定期平均成長量は、ほとんどの試験区において60年以下でピークに達しており(図-6(c), (d)), その後は明らかな減退傾向を示した(図-5(a), (b))。林分の純生産量(本研究における林分材積定期平均粗成長量と最も定義が似ている)の値は、林分の比較的若い時期に、ある最大値に達した後、次第に減少すると考えられている(Kira and Shidei, 1967; Ryan *et al.*, 1997)。一方で、林分の純生産量は最大値に達した後、一旦は減少するが、その後林分葉量が一定に保たれ、林分の樹幹表面積が上限値に達すると、ほぼ一定に保たれるという予測もなされている(大畠・四出井, 1974)。本研究のデータの範囲では林分材積定期平均成長量はピークに達した後、漸減する傾向にあり、前者の傾向と一致していた。北海道のカラマツ人工林において林分材積の成長傾向を調べた報告(清和, 1990)では、後者の傾向と一致していたことから、樹種・地域によって成長減退の傾向が異なる可能性がある。

林分材積定期平均純成長量が明らかな減退傾向を示し、壮齢時にピークをもっていた一方で、林分材積総平均純成長量は林分材積定期平均純成長量ほどには明瞭な低下傾向を示さずに(図-4(a), (b)), ほとんどすべての試験区でピーク林齢は60年を越えていた(図-6(a), (b))。また、約半数の試験区では80年以上でピークを迎えていた。したがって、60年を越えた高齢級まで林分材積総平均純成長量が増加し続けることが明らかである。本研究のデータセットに含まれる多くの試験区の密度管理は収穫表の示す密度管理に似ていたが(図-13), 無間伐区も含まれていた。したがって、林分材積総平均純成長量が林齢60年以上まで増加するという傾向は、密度管理の違いを越えた特徴と考えられる。大住ら(2000)は、本研究のデータセットに比べて地位の良い試験区の多く含まれる秋田地方のスギ人工林に関するデータセットを解析して、間伐処理の違いを超えた全般的な特徴として、高齢級においても総平均成長量の明瞭な低下が認められないことを報告した。本研究のデータセットは地位中程度の林分が含まれていることから(図-2), 林分材積総平均純成長量が林齢60年以上まで増加することは、地位の違いを超えた傾向であるといえるだ

ろう。以上から、地位や密度管理の違いにかかわらず、秋田地方のスギ人工林の林分材積総平均純成長量は林齢60年以上まで増加が続くと考えられる。

わが国で用いられてきた材積収穫量最多の輪伐期は林分材積総平均純成長量を最大にする林齢に等しい(鈴木, 1979; 田中, 1996)。したがって、伐期を設定する上で、林分の成長量に関して最も重要な問題は林分材積総平均純成長量がいつの時点で最大になるかである。そのため、本研究で得られた結果は、木材を持続的にできる限り最大に供給しようとする観点からは、地位や密度管理の違いにかかわらず、標準伐期を60年以上に設定することが不合理でないことを示している(大住ら, 2000)。

林分蓄積に累積間伐量を加えた林分材積総平均純成長量と林分蓄積に累積間伐量と累積枯死量を加えた林分材積総平均粗成長量を比較すると、後者のピーク林齢が高くなる傾向があった(図-6(a), (b))。林分材積総平均粗成長量においては、最終調査時点に最大値がみられる試験区が半分を占めており(図-6(b)), 多くの試験区における実際のピーク林齢は今回の結果よりも高くなると推察される。枯死量の中には、光をめぐる競争の結果として被圧されて枯死してしまう個体の材積量と風害や雪害などの突発的な攪乱によって枯死してしまう個体の材積量が含まれている。したがって、短い間隔で間伐を実行することによって、被圧による枯死木を収穫できれば、林分材積総平均純成長量のピーク林齢をさらに高めることができるであろう。また、施業の実施によって、風害や雪害に強い森林を育成し、そのリスクを回避することができれば、林分材積総平均純成長量のピーク林齢をさらに高めることができるであろう。

2. 林分の伸長成長・肥大成長と林分材積成長との関係

上層樹高、断面積合計の定期平均成長量は、林分材積のそれと同様に、明瞭な減退傾向を示しており、減退傾向は若齢時から認められた(図-7(b), 9(a), (b))。上層樹高と断面積合計の定期平均成長量については、半数以上の試験区で、第一回目の調査期間において最大値を示した(図-10(b)と図-11(c), (d))。このため、両者の定期平均成長量の減退が、実際にいつの時点で始まっているのかについてはわからなかった。ただし、林分材積と比較すると、両者の定期平均成長量は早い時期に減退し始めていた。総平均成長でみると、樹高成長と断面積合計には明瞭な成長量の低下傾向が認められたが(図-7(a), 8(a), (b)), 林分材積については明確ではなかった(図-4(a), (b))。総平均成長量のピーク林齢は、上層樹高、断面積合計、林分材積の順に高齢に推移した(図-10(a), 11(a), (b), 6(a), (b))。一般に、樹木個体の成長量のピークは、樹高成長、直径成長、断面積成長、材積成長の順に現れるといわれている(たとえば、堀田, 1928; Mäkelä, 1986; 南雲・箕輪, 1990)。本研究で取り上げた林分構成値(上層樹高、断面積合計、林分材積)における成長量のピークのあらわれる順番は、樹木個体の伸長成長、肥大成長、材積成長における成長量のピークに関する知見と一致していた。

形数法を応用すると形状成長・伸長成長・肥大成長と材積成長との関係を統一的に理解することが可能となる(堀田, 1928)。ここでは、この方法を用いて林分材積総平均成長量・胸高断面積合計総平均成長量・上層樹高総平均成長量の関連について考察したい。形数法では、個体の材積は、胸高形数、胸高断面積、樹高の積として示される(大隈ら, 1971)。また、林分材積は、林分胸高形数、胸高断面積合計、平均樹高との積で示される(大隈ら, 1971)。これらからの類推として、本論文では林分材積総成長量 V 、林分胸高形数 a 、断面積合計総成長量 B 、上層樹高 H の関係は、 $V=aBH$ で示され、 a は定数であると仮定する(仮定①)。この関係を用いて林分材積総平均成長量 V/t の導関数を求めると(4)式あるいは(5)式を得る。

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{V}{t}\right) = a\left\{H \frac{d}{dt}\left(\frac{B}{t}\right) + \frac{B}{t} \frac{dH}{dt}\right\} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{V}{t}\right) = a\left\{B \frac{d}{dt}\left(\frac{H}{t}\right) + \frac{H}{t} \frac{dB}{dt}\right\} \quad (5)$$

また、断面積合計総平均成長量 B/t を t で微分すると次式を得る。

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{B}{t}\right) = \frac{t \frac{dB}{dt} - B}{t^2} \quad (6)$$

(5)式と(6)式から次式を得る。

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{V}{t}\right) = a\left\{B \frac{d}{dt}\left(\frac{H}{t}\right) + H \frac{d}{dt}\left(\frac{B}{t}\right)\right\} + \frac{V}{t^2} \quad (7)$$

ここで、さらに、上層樹高と断面積合計が単調増加する($dH/dt \geq 0$ かつ $dB/dt \geq 0$) と仮定する(仮定②)。このとき、(4)式より断面積合計総平均成長量が増加している場合($d(B/t)/dt > 0$)には、常に林分材積平均成長量が増加すること($d(V/t)/dt > 0$)がわかる。同様に、(5)式より上層樹高総平均成長量が増加している場合($d(H/t)/dt > 0$)には、常に林分材積総平均成長量も増加すること($d(V/t)/dt > 0$)がわかる。また、(7)式から、上層樹高総平均成長量と断面積合計総平均成長量とともに減少している場合($d(H/t)/dt < 0$ かつ $d(B/t)/dt < 0$)であっても、両者の平均成長量の総合した結果である(7)式の右辺が正となるような状況では、林分材積総平均成長量が増加すること、両者の平均成長量がさらに減少した場合にのみ、林分材積総平均成長量が減少することがわかる。したがって、林分材積総平均成長量のピーク林齢は、常に断面積合計・上層樹高の総平均成長量のピーク林齢よりも高齢となり、断面積合計や上層樹高の総平均成長量とともに低下し始めても、林分材積総平均成長量が増加し続ける場合があることが理解できる。

林分胸高形数 a の経年推移をみると、林分材積総純成長量から求めた a_{net} は無間伐林で増加し、間伐林で減少していた(図-12(a))。また、林分材積総粗成長量から求めた a_{gross} は間伐林、無間伐林ともに減少していた(図-

12(b))。しかし、いずれの場合においても a の変化量はわずかであり、この結果は上記した仮定①をおおむね満たしているといえる。また、一つの試験区を除いて上層樹高は常に増加していた(図-7(b))。さらに、二つの試験区を除いて断面積総平均成長量は常に増加していた(図-9(a), (b))。これらの結果は上で提示した仮定②をおおむね満たしていると考える。したがって、形数法を応用した方法に基づいて、伸長成長・肥大成長と林分材積成長との関係を解釈することが可能だと考えられる。ここでの議論と本研究で得られた各林分構成値の成長量の推移から、上層樹高、断面積合計、林分材積の間には、平均成長量の経年推移について以下のような関係があると考えられる。①上層樹高総平均成長は若齢期に低下し始め、高齢期の成長量は小さい。②断面積合計総平均成長は低下し始める時期が樹高と比べて遅く、比較的長期にわたって成長量が増加する。③両者の平均成長量の総量として、高齢期の林分材積総平均成長量が確保されるので、両者と比較すると林分材積総平均成長量は長期にわたって増加し続け、ピークに達する時期が遅くなる。

V. おわりに

本研究により、秋田地方のスギ人工林の林分材積総平均成長量が、密度管理や地位の違いにかかわらず、林齢60年生以上まで増加することが明らかとなった。このことより木材を持続的にできる限り最大に供給しようとする観点からは、伐期を60年以上に設定することが合理的であると考えられる。しかし、経済性を考慮して最適伐期を考える場合には、林分材積成長以外に種々の要因を考慮する必要がある。例えば、風害などのリスクを考慮して最適伐期を推定した報告(Kuboyama and Oka, 2000)では、林分の成長量、自然災害リスクの林齢依存性、素材価格、伐出コストおよび育林コスト等が計算に含まれている。今後は、上記に加えて病虫害リスクや素材価格・伐出コストのサイズ依存性も含めて多面的に伐期に関する検討を進めていく必要があるだろう。

また、林齢60年まで総平均成長量が増加する傾向は、密度管理や地位の違いにかかわらず全般的に認められたが、ピーク林齢は地位(堀田, 1928; Assman, 1970)や密度管理(Ryan *et al.*, 1997)によって異なることが指摘されている。したがって、60年以上の林齢においてあらわれるピーク林齢の大小については、地位や密度管理の影響を受けている可能性がある。このことについては、次報にて報告する予定である。

さらに、今回のデータセットは秋田地方に限定されているので、他の地方においても総平均成長量の増加が長期にわたって確保されるか否かは明確でない。最近、高齢級データを追加して調製された鹿児島県、熊本県および岩手県の収穫予想表(林野庁, 2005)では、平均成長量が40年以下でピークに達しており、これらの地域と本研究で取り上げた秋田地方とでは成長傾向が大きく異なっている可能性

がある。こうした成長量の地域性を明らかにするために、収穫試験地データなどの現実林分の総合的な解析が必要である。

長期にわたり試験地の維持管理、調査に尽力された、東北森林管理局および森林総合研究所東北支所（旧林業試験場東北支場）の関係者諸氏に深く謝意を表す。特に、近年における試験地調査の体制整備にご尽力された中北 理博士に対して深く謝意を申し上げる。九州大学の吉田茂二郎博士と溝上展也博士には、原稿作成にあたって貴重なご批判とご意見をいただいた。厚く御礼を申し上げる。

引用文献

- 秋田営林局（1949）秋田地方すぎ林分収穫表. 9 pp, 林野局, 東京.
- Assmann, E. (1970) *The principles of forest yield study*. 506 pp, Pergamon Press, Oxford.
- 細田和男（1995）紀州地方高齢人工林の林分成長—高野山スギ・ヒノキ収穫試験地定期調査報告—. 森林総研関西支所年報 37 : 45-47.
- 堀田正逸（1928）測樹学. 350 pp, 三浦書店, 東京.
- Kira, T. and Shidei, T. (1967) Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Jpn. J. Ecol.* 17 : 70-87.
- 気象庁（2002）メッシュ気候値 2000. (財)気象業務支援センター, 東京 (CD-ROM).
- Kuboyama, H. and Oka, H. (2000) Climate risks and age-related damage probabilities—Effects on the economically optimal rotation length for forest stand manage in Japan. *Silva Fenn.* 34 : 155-166.
- Mäkelä, A. (1986) Implications of the pipe model theory on dry matter partitioning and height growth in trees. *J. Theor. Biol.* 123 : 103-120.
- 南雲秀次郎・箕輪光博（1990）測樹学. 243 pp, 地球社, 東京.
- 大畠誠一・四出井綱英（1974）森林の純生産量の経年推移に関する検討. 京大演報 46 : 40-50.
- 大隈眞一・北村昌美・菅原 聰・大内幸雄・梶原幹弘・今永正明（1971）森林計測学. 415 pp, 養賢堂, 東京.
- 大住克博・森麻須夫・桜井尚武・斉藤勝郎・佐藤昭敏・関 剛（2000）秋田地方で記録された高齢なスギ人工林の成長経過. *日林誌* 82 : 179-187.
- 林野庁（1980）秋田地方国有林スギ林分密度管理図. 6 pp, 日本林業技術協会, 東京.
- 林野庁（2005）大型プロジェクト研究成果 長期育成循環施策に対応する森林管理技術の開発. 160 pp, 林野庁, 東京.
- 林野庁計画課（1970）立木幹材積表東日本編. 333 pp, 日本林業調査会, 東京.
- Ryan, M.G., Binkley, D., and Fownes, J.H. (1997) Age-related decline in forest productivity: pattern and process. *Adv. Ecol. Res.* 27 : 213-262.
- 清和研二（1990）林分成長量の林齢にともなう変化—カラマツ人工林における地位間の比較—. *日林北支論* 38 : 53-55.
- 鈴木太七（1979）森林経理学. 197 pp, 朝倉書店, 東京.
- 竹澤邦夫（2001）みんなのためのノンパラメトリック回帰. 560 pp, 吉岡書店, 京都.
- 田中和博（1996）森林計画学入門. 192 pp, 森林計画学出版局, 東京.
- 寺崎康正・小坂淳一・金豊太郎（1964）林分の構造と成長, 収穫に関する研究第1報—秋田スギ人工林の成長と収穫—. *林試研報* 168 : 1-306.
- Wang, Y. and Ke, C. (2004) ASSIST: A suite of S functions implementing spline smoothing techniques. 127 pp, University of California, Santa Barbara.
- 山田茂夫・村松保男（1963）例解測樹の実務. 249 pp, 地球出版, 東京.