

## 論文 (Original Article)

# 立木の空間分布および生育条件が個体成長に及ぼす影響

宮本 麻子<sup>1)\*</sup>・天野 正博<sup>1)</sup>

## Difference of Growth by the Spatial Distribution of Individual Trees and Growth Factor

MIYAMOTO Asako<sup>1)\*</sup> and AMANO Masahiro<sup>1)</sup>

### Abstract

This paper intends to clarify the relationships between growth rate of individual trees and its geographic environment from several viewpoints which are composed of spatial distribution of individual trees, competition indices among trees and topographic conditions. Basic data of this analysis was obtained from two permanent plots located in Ibaraki and Gunma prefectures respectively. Morisita's index was utilized to identify a spatial distribution of individual trees as well as to show distribution dynamics as trees getting old. According to the Morisita's index, trees in an artificial stand are evenly distributed at the beginning stage, then the spatial dispersion of trees has continuously showed an uniformed distribution though human operations were implemented. Various research cases were collected to study validity of competition indices among individual trees for projecting a tree growth, and we verified the limitation of competition indices to project it. Growing performance of individual trees was affected by autocorrelation of tree size factors rather than competition indices which were expressed by area occupancy of individual tree or distance indices among trees. In addition, the relationship between individual tree growth and topographic conditions was examined by using quantification method I. Topographic factors such as aspect, slope, sedimentation degree, slope form, position on the slope were adopted as predictor variables for growth increment of trees and, the results showed that tree height was affected by topographic conditions, but diameter wasn't. Therefore, our research showed that forestry operations to affect spacing of trees were not effectively influenced to future growth of individual trees.

**Key words:** individual tree, spatial distribution, competition indices, autocorrelation, topographic conditions

### 要旨

本研究はスギ人工林を対象とし、樹木個体の空間配置および生育条件との関係から個体成長量の差異を解析することを目的とした。用いた資料は、茨城県および群馬県の固定標準地の直径および樹高の時系列測定データである。はじめに、樹木個体分布パターンの時系列変化を森下のI 指数により解析した。その結果、成長の初期段階において人工林における立木の空間分布は一様であり、さらに間伐という人為インパクトによっても個体の分布パターンが変化しないことが示された。次いで、種内間の競争状態を表す個体間競争指数について関連する研究例を整理し、競争指数の限界を明らかにした。占有空間量の変化や個体間の距離が成長量の変化に与える効果は、個体自身もつ直径や断面積といった自己サイズによる影響と比較すると小さいことが明らかになった。さらに、個体と地形条件の関係を数量化 類により解析した。地形条件として斜面方位、傾斜、堆積度、斜面型、斜面位置を用いたところ、樹木は地形条件によりその樹高サイズに影響を受けるが、直径については地形条件からは影響を受けないことが示された。以上のことから、ある程度個体差が生じた後では、間伐により個体の占有空間を増やしても、残存木の成長を等しく促進させることは困難であり、小径木の成長は大径木の成長ほどは促進されないことが明らかになった。

キーワード：個体、空間分布パターン、競争指数、自己相関、地形条件

原稿受付：平成14年3月14日 Received Mar. 14, 2002 原稿受理：平成14年7月24日 Accepted Jul. 24, 2002

\* 森林総合研究所 森林管理研究領域 〒305-8687 稲敷郡笠崎町松の里1

Department of Forest Management, Forestry and Forest Products Research Institute, P.O.Box16, Tsukuba Norin Kenkyu Danchi-nai, Ibaraki 305-8687, Japan; e-mail: asakom@ffpri.affrc.go.jp

1) 森林総合研究所 森林管理研究領域

## 1 はじめに

我が国の主要な造林樹種であるスギ・ヒノキの林分成長に関しては、施業計画や経営計画を策定する上での重要性から、数多くの研究がなされてきた。それにより、人工林の林分成長予測については収穫表や林分密度管理図といった事業レベルで利用可能なモデルが確立されており、そこでは、林分密度、平均樹高、平均直径、林分材積のような林分因子の平均値が用いられている。

収穫表や密度管理図といった林分の平均値や総量に関する情報にもとづく成長予測をさらに進め、林木単位までも含む柔軟な予測を試みたものとしてはシステム収穫表がある。これは様々な状態にある林分について施業体系を自由に選択し、施業が行われた場合の将来の成長過程や直径分布などを自在に予測できるものであり、林分レベルの変化予測のみならず、それらの変化を直径分布の形で予測できる。ただし、この場合も個々の立木毎の直径成長を求めることはできない。

一方、近年のように森林の持つ様々な機能を十分に発揮できるような林分構造に誘導するための施業が求められ、木材生産目的の施業にしても間伐時の収益を考慮して強度の間伐を実施するようになると、林分レベルのマクロな視点のみだけでなく、立木レベルでのミクロな視点からの成長予測も、林業経営者には重要となってくる。

施業面においてみれば、従来は残存木の健全な生育をうながし、将来の収益を期待する意味で下層間伐が中心とされてきたが、近年の木材価格の低下にともない、主伐以前の中間段階で収益を得るため上層間伐やナスピ伐りなど、保育重視から収益重視の間伐方式へと変化してきている。下層間伐は林分の小個体を中心として間伐する方法であり、主として林分の優勢木が残されることから林分の各種平均値はドラスティックには変化しないため、残存木の成長については、林分としての平均成長を捉える林分密度管理図でそのまま管理できる。一方、上層間伐については林分構造の変化が大きく密度管理図も目安程度にしか利用できない(林野庁, 1997)。また、下層間伐後の林分の成長についての報告は多々見られるが(家原, 1991; 松本, 1991; 松村, 1991; 木梨ら, 1981a; 木梨ら, 1981b)、林内環境が下層間伐に比べて大きく変化し、残存木の成長にも影響を与えると考えられる上層間伐後の成長に関する報告は、ほとんど見られない。そのため、施業面からも、従来の林分レベルの平均成長のみならず、個々の立木レベルでの成長に着目する必要性がある。

林分における樹木の個体サイズや成長は、個体の遺伝的特質の他に、微気象、水分、養分の分布状況、および生育空間=光環境や水分、養分条件といった資源をめぐる種内競争にも影響されると考えられている。オダム(オダム, 1971)は、集団化としての存在価値は、集合により生ずる重要な特徴であり、植物の集団は散らばっている個体よりも風の作用に強く抵抗でき、水分の損失を効

果的に減少させることができるとし、個体群における集団化の利益を述べている。また、ヒルミ(ヒルミ, 1965)は、独立して生育している樹木の成長は、その樹木の内的性質に制約され、その樹木に固有な個体発生法則に決定されるが、林分中に生育している植物は、樹冠閉鎖の瞬間から、樹木の大きさや形態の変化は、その樹木に固有な個体発育の法則性と、各樹木が林地で自分に似た生物体の側から経験するものが結合されて発現され、ときによると森林は、完全に、非常に強い程度に個々の植物の発育と内的法則の発現を支配し、その成長と発育に作用することがある、としている。そして、林地の影響が個々の樹木の形態的成長に対し、主導的役割をつとめる例としてマツ林をあげている。

また、草本植物でしばしば観察される現象に、個体間の協同的相互作用として考えられている背揃い現象があるが、樹木林分においてもこのような個体間の協同的相互作用の可能性を示唆する報告が見られる(清和, 1982; 猪瀬, 1984)。このように、林分では協同的相互作用と競争による排他的相互作用が働いており、林木の成長を考える上で、個体自身の特性の他に、周囲の林木との関係を考慮する必要がある。

森林の成長に関しては林分レベルで捉えるだけでなく立木レベルでの検討も必要であり、これまでも立木間競争を考慮した多くの研究がなされているが、実用段階に到達した研究成果は少ない。とくに、個体成長を考える上で個体成長に空間の競合関係を組み込む効果および、その限界について体系的に整理した報告は、これまでに行った文献整理では見られなかった。

本稿では、固定標準地のデータを用いて樹木個体の分布パターンの時系列変化を解析し、種内間の競争状態を表す個体間競争指数について関連する研究例を整理した。さらに、生育条件や人為インパクトと個体成長との関係から、個体成長に影響をおよぼす因子の限界性についても明らかにした。最後に、様々な森林施業により林分構造がどのように変化するかを適切に林業経営者に提示するため、立木レベルでの成長予測に関して解決すべき問題につき考察を行った。

## 2 研究対象地および研究方法

### 2.1 対象地の概要

生育条件や人為インパクトと個体成長との関係を調べるには、ある程度の広がりを持ち、様々な施業が行われ、長期間にわたりデータ収集が行われている林分を対象とすることが望ましい。

そこで対象地を群馬県群馬森林管理署管内前橋事業区199ろ林班(後、小班へ変更)小野子固定標準地(以下、小野子試験地)のスギ人工林(面積0.5ha)および茨城県茨木森林管理署管内高萩事業区69ぬ林班上君田固定標準地(以下、上君田試験地)のスギ人工林(面積1.0ha)の2林分とした(Fig. 1)。小野子試験地は海拔600~650m、

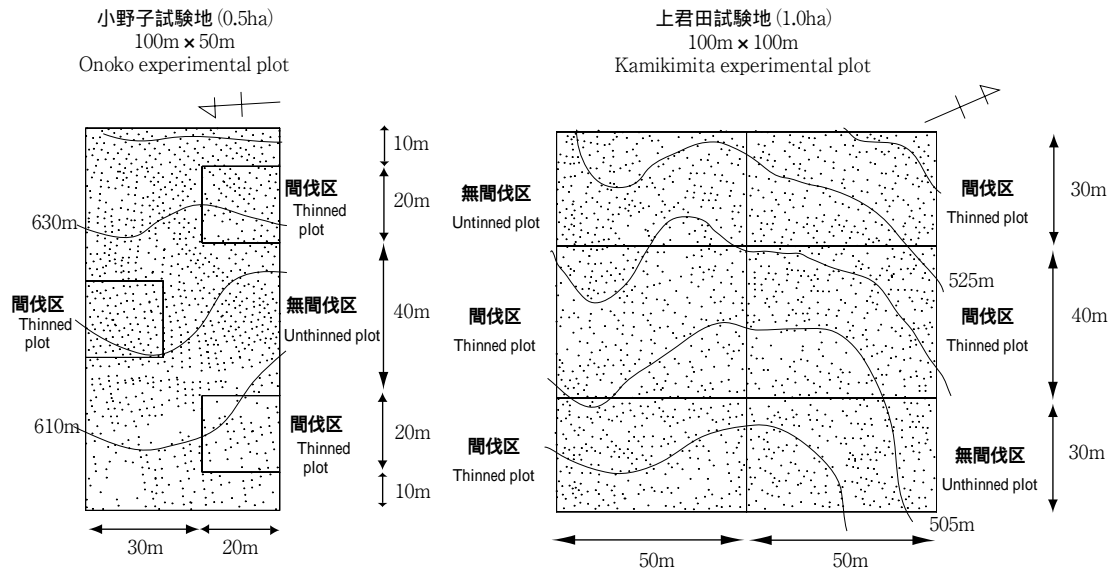


Fig.1. 試験区配置および立木位置  
Location of the experimental plots and positions of individuals

傾斜は約 $20^\circ$ の西向き斜面で、土壌型は $B_{D(d)}$ である。上君田試験地は海拔450～550m、傾斜約 $20^\circ$ の南東向き斜面、土壌型は $B_D$ である。これら2林分ではそれぞれ30～40年にわたりデータ収集が行われており、1林分の変化を時系列的に追うことができる。また両試験地ともに試験地設定時に立木位置図が作成されている。

小野子試験地は間伐区3区と無間伐区で構成され、上君田試験地は間伐強度の異なる間伐区4区と無間伐区2区で構成される。これらの試験地では成長量の把握を目的として、ほぼ5年間隔で胸高直径および樹高の毎木測定が行われている。小野子試験地は、1945年に新植され、1959年(林齢14年)に試験地に設定されており、1999年現在までに12回の測定調査と2回の間伐が行われている。試験地の設定される1959年までに数回の下刈りとする切りは行われているが、除伐や間伐は行われていない。上君田試験地は1919年に新植され、1967年(林齢48年)に試験地設定をうけ、1996年現在までに7回の測定調査と2回の間伐が行われている。試験地設定時までの施業履歴は不明であるが、設定時に均一でしかも最近間伐が実施された形跡のない閉鎖した林分中に設定されている。上君田試験地は初回のみ樹高の毎木測定が行われ、その後は標準木について樹高測定が行われている。Table 1、Table 2にこれら試験地の調査概要、間伐概要を示す。

## 2.2 研究方法

本稿では、個体成長について、空間分布パターンおよび個体間競争、生育条件との関係から考察を行った。

空間分布パターンの解析では、固定標準地のデータを用い、人工林での樹木個体の空間分布パターンの時系列変化について解析した。

個体間競争指数の限界の検討では、種内間の競争状態

を表す競争指数についての研究例を整理するとともに、試験地データをもとに競争指数を算出し、直径成長に与える影響を検討した。

さらに、個体成長に影響を与える生育条件として、地形を取り上げ、個体成長との関係を解析し、最後に、様々な森林施業により林分構造がどのように変化するかを適切に林業経営者に提示するため、立木レベルでの成長予測に関して解決すべき問題につき考察を行った。

## 3 個体成長の解析

### 3.1 空間分布パターンの時系列変化

菊沢(菊沢, 1988)は若いダケカンバ林を対象に、立木位置の時系列的な空間分布の変化をI 指数を用いて調べ、林分全体ではランダムに分布、胸高直径上位10%木は一樣分布、上位33%の個体はランダム分布から一樣分布へと移行したことから、大径木がほぼ均等に分布し、小径木がその隙間をうめ、競争に負けた小径木が自然枯死する結果として、林分はランダム分布することを報告した。さらに、石橋(石橋, 1989)は北海道の天然林についてI 指数と 指数を用いた解析を行い、小径木は立木密度の高い林分で、基本的にランダム分布を示し、立木密度が低い林分では集中分布を示すこと、中大径木は小径木の分布パターンにかかわらず、基本的に一樣分布を示すことを報告した。また、MOEUR(MOEUR, 1993)はアイダホ北部の老齢天然林において、個体間の競争的相互作用は森林の分布パターンを集中分布から一樣分布へと変化させることを示した。これらの報告から明らかのように、天然林においては個体間競争は空間分布に影響を与え、同時に、空間分布は、個体の競争関係に影響を与えることから森林の分布はダイナミックに変動すると考えられる。

Table 1. 試験地の調査概要  
Outline of the experimental plots

小野子試験地  
Onoko experimental plot

測定回数 Number of measurements	測定年 Year of survey	林齢(年) Stand age	調査本数(本/ha) Number of trees				試験地内間伐率(%) Thinning ratio in experimental plot
			健全木 Sound tree	被害木 Damaged tree	枯損木 Dead tree	間伐木 Thinned tree	
1	1959	14	2150	-	-	-	-
2	1962	17	2118	4	28	-	-
3	1964	19	2052	36	34	-	-
4	1967	22	2028	54	6	106	5.2
5	1969	24	1800	154	22	-	-
6	1972	27	1788	106	60	-	-
7	1974	29	1790	76	28	-	-
8	1979	34	1740	8	118	-	-
9	1985	40	1644	14	90	-	-
10	1989	44	1514	50	94	-	-
-	1990	45	-	-	-	302	19.9
11	1994	49	1148	66	48	-	-
12	1999	54	1092	98	24	-	-

上君田試験地  
Kamikimita experimental plot

測定回数 Number of measurements	測定年 Year of survey	林齢(年) Stand age	調査本数(本/ha) Number of trees				試験地内間伐率(%) Thinning ratio in experimental plot
			健全木 Sound tree	被害木 Damaged tree	枯損木 Dead tree	間伐木 Thinned tree	
1	1967	48	1636	0	28	-	-
-	1968	49	-	-	-	324	19.8
2	1972	53	1276	0	36	-	-
3	1977	58	1222	0	54	-	-
4	1982	63	1170	0	52	-	-
-	1985	66	-	-	-	370	31.7
5	1988	69	745	1	55	-	-
6	1992	73	710	14	22	-	-
7	1996	77	663	33	28	-	-

Table 2. 間伐概要  
Summary of the thinnings

小野子試験地  
Onoko experimental plot

間伐回数 Number of thinnings	測定年 (林齢) Year of survey (Stand age)	立木本数(本/ha) Number of trees	間伐区 Thinned plot	間伐区 Thinned plot	間伐区 Thinned plot
第1回 The first time	1968年 (49年生)	間伐前 Before thinning	1375	2375	2125
		間伐本数 No. of thinning trees	375	475	475
		間伐後 After thinning	1000	1900	1650
		間伐率(%) Thinning ratio	27.3	20.0	22.4
第2回 The second time	1985年 (66年生)	間伐前 Before thinning	1000	1625	1450
		間伐本数 No. of thinning trees	350	600	775
		間伐後 After thinning	650	1025	675
		間伐率(%) Thinning ratio	35.0	36.9	53.4

上君田試験地  
Kamikimita experimental plot

間伐回数 Number of thinnings	測定年 (林齢) Year of survey (Stand age)	立木本数(本/ha) Number of trees	間伐区 Thinned plot	間伐区 Thinned plot	間伐区 Thinned plot	間伐区 Thinned plot
第1回 The first time	1968年 (49年生)	間伐前 Before thinning	1753	1455	1605	1653
		間伐本数 No. of thinning trees	633	320	395	540
		間伐後 After thinning	1120	1135	1210	1113
		間伐率(%) Thinning ratio	36.1	22.0	24.6	32.7
第2回 The second time	1985年 (66年生)	間伐前 Before thinning	1107	1085	1155	1087
		間伐本数 No. of thinning trees	633	430	505	580
		間伐後 After thinning	474	655	650	507
		間伐率(%) Thinning ratio	57.2	39.6	43.7	53.4

一方、人工林の空間分布は植栽時に等距離、等間隔の方形で植えられていることから、初期には一様分布をしているが、個体間競争による被圧や枯損による枯死木の発生、除伐や間伐により、順次立木本数は減少し、徐々に分布が変化すると考えられる。しかし、実際には成熟した人工林に残存する立木は必ずしも個体間競争によって生き残ったわけではなく、長期には施業や自然災害(気象害)が空間分布パターンを急激に変化させ、個体間競争に影響を与えている可能性がある。そのため、個々の立木の成長を評価する上で時系列的な空間分布パターンの変化が単純な立木間での競合の結果なのかを検討した。

空間分布パターンの解析には、MORISITAのI 指数(MORISITA, 1959)を用いた。MORISITAのI 指数は調査対象地域をq個の同面積の区画にわけ、第i番目の区画に含まれる個体数をni、総個体数をNとすると、次式で表すことができる。

$$I_s = q \frac{\sum_{i=1}^q ni(ni-1)}{N(N-1)}$$

この指数は分布がランダムな場合には = 1、集中分布の場合は > 1、一様分布の場合は < 1 となる。また、区画面積の変化に対するI 指数の動きから個体の分布パターンを判定することができる。

Fig. 2、3 に小野子試験地、上君田試験地における間伐区、無間伐区の空間分布パターンを示した。その結果、両試験地において間伐区、無間伐区とも一様分布の傾向を示した。小野子試験地および上君田試験地は各2回の間伐を受けているが、間伐による空間分布パターンの変化はどちらの試験地においても見られなかった。間伐木は選木時に隣接木との関係や樹冠を考慮し、残存木の配置が均等になるように選木される。このため、間伐区

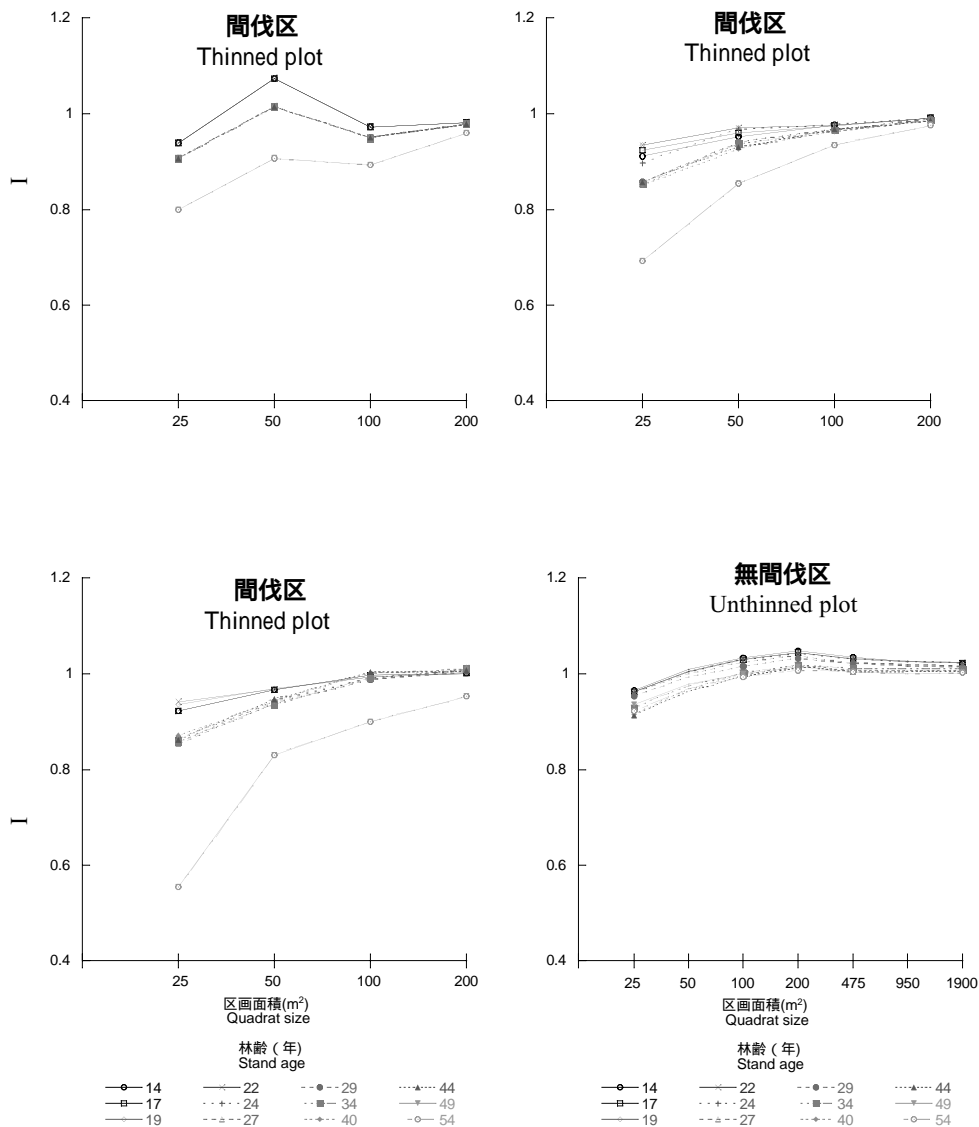


Fig.2. I - 区画面積曲線 (小野子試験地)  
I - quadrat size relation (Onoko experimental plot)

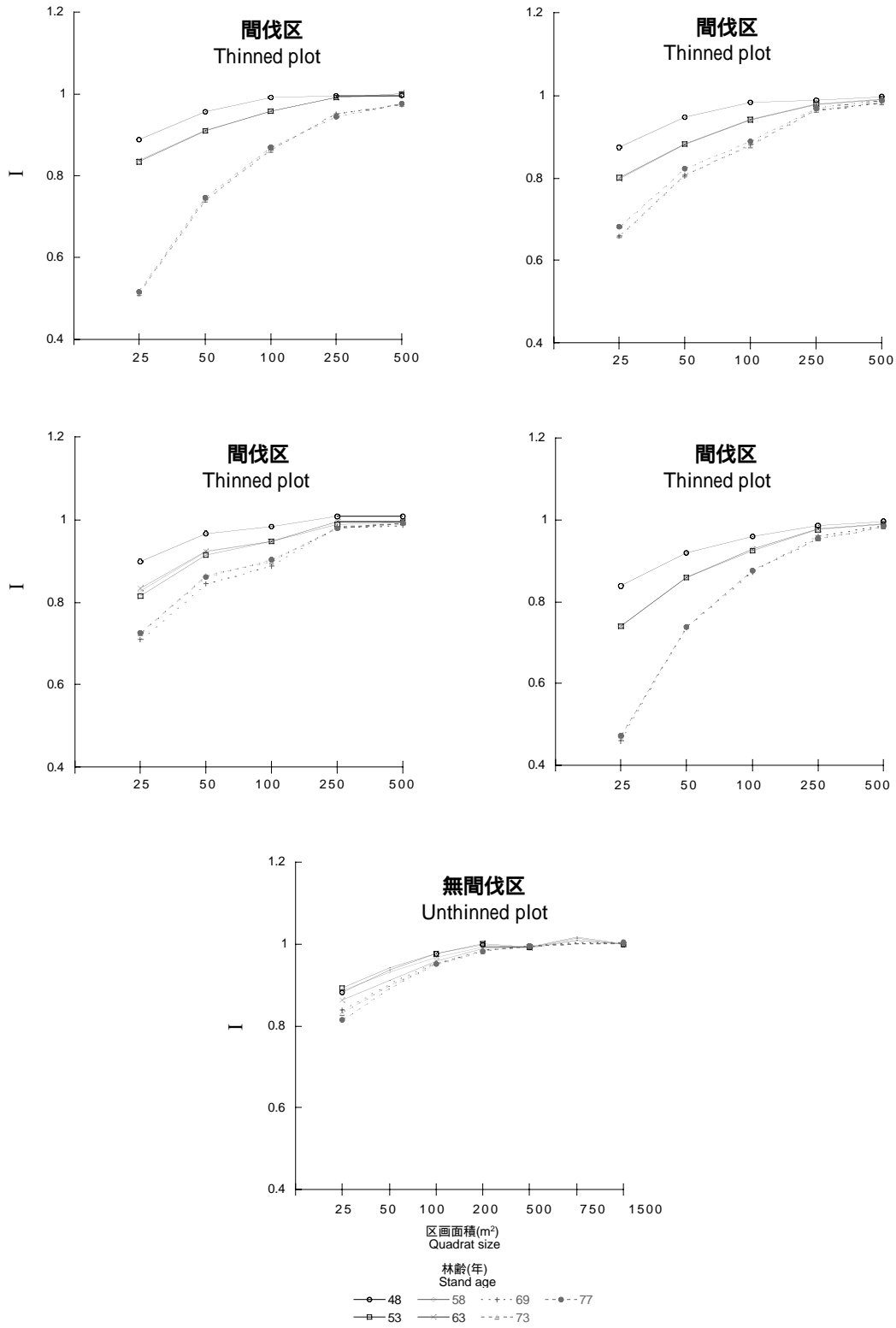


Fig.3. I - 区画面積曲線 (上君田試験地)  
I - quadrat size relation (Kamikimita experimental plot)

内において、残存木の立木配置は一様をとり、空間分布パターンが一様を示すと推察できる。この結果から間伐という人為インパクトを林分に与えた場合も、空間分布は一様を示すことが示された。

水永(水永, 1983)は23年生スギ人工林を対象に、森下のI 指数により分布パターンを調べ、全立木は一様分布に近いランダム分布をすることを報告した。清和(清和, 1987)はトマツ人工林において、20~50年生の分布パターンの経年変化を森下のI 指数により解析し、全立木の分布は常に一様分布の傾向を示すことを報告した。また、北元ら(北元ら, 1972)も同様に、同種同齢の人工林においては全立木は一様分布を示すことを報告している。

今回の小野子、上君田の両試験地における解析結果は、これらの報告と同様に一様分布の傾向を示していた。

人工林は、当初、等距離、等間隔で規則正しく植えられているため、除伐や被圧木の枯損により本数が減少しても、植栽時の影響が強く残り、ランダムまたは一様分布の傾向を示すと考えられる。

無間伐区の解析結果に見られるように、自然災害や間伐といった人為的なインパクトがない場合の枯損は競争に負けた個体サイズの小さな木に生ずるため、個体間競争のみでは分布パターンを変化させるほどの大きな影響はない。また、間伐という人為インパクトを与えた場合も、残存木の配置を考慮して選木している影響により空間分布パターンは無間伐時と同様に一様分布になる。だが、空間分布が一様を示しても、間伐区においては1個体当たりの占有空間量が変化するため、通常の競争では起こり得ない占有空間の変化が個体間の成長に影響を与えることが考えられる。そのため3.2節で従来の個体間競争指数について研究例を整理し、3.3節では個体成長がどこまで説明できるのか競争指数の限界性について解析した。

### 3.2 単木競争指数に関する研究

単木の成長を予測する方法は、単木距離独立モデル(Distance-independent individual tree model 以下DIモデルとする)と単木距離従属モデル(Distance-dependent individual tree model 以下DDモデルとする)とに分けられる(木梨, 1974)。DIモデルは成長予測に立木の位置情報を必要とせず、林分レベルでの平均的な指標や初期サイズをパラメータとして用いるものであり、DDモデルは、隣接木の本数やサイズ、対象木と隣接木との空間配置関係を組み込むものである。

ある場所の立木の成長は林齢、立木サイズ、生育条件、遺伝的特質や隣接木との競争状態といった様々な要因により規定されており、立木の成長に関する競争環境が競争指数(Competition indices)として表される。距離独立競争指数(Distance-independent competition indices 以下DICIとする)は個々の立木の直径、樹高、胸高断面積等の個体サイズと林分の平均値との比が用いられ、樹木間相互の位置関係を含まないところに特徴がある。

一方、距離従属競争指数(Distance-dependent competition indices 以下DDCIとする)は、局所的に限られた光や水分、養分といった成長に必要な資源の獲得競争をしている隣接木の影響を測定したものが用いられる。局所的な隣接木の影響は、通常は個体サイズ、隣接木と対象木間の距離または占有面積を考慮した単純な数学的表現により表される。個体の成長は常に隣接木の大きさと配置による個体間の競争状態に影響されるという仮定から、林分内における個体間の競争の程度を様々な指標で定量化する数多くの方法が提案されてきた。LORIMER(LORIMER, 1983)によると、それらは次にあげる3つのカテゴリーに分けることができる。

1. 拡大円(Zones of influence); 対象木について隣接木に影響を与える個体の大きさに比例する拡大円を想定し、隣接木の拡大円との重複比率により単木間の競争度合を表す方法である。隣接木の拡大円が対象木の拡大円と重なり合っている場合、その隣接木は対象木に影響のある競争木としてみなされる。拡大円の最も一般的な定義は胸高直径の線形関数で示される。OPIE(OPIE, 1968)は対象木を中心とした拡大円と競争木の拡大円が重複する面積比を用いてhaあたりの断面積合計を求めるゾーンカウントモデルを提唱した。さらにBELLA(BELLA, 1971)はOPIEのゾーンカウントモデルの考え方を発展させ、対象木と競争木との間で重複する拡大円面積に直径比を加重することで競争度合を求めた。

2. 成長空間多角形(growing space polygons); 林分を各個体が潜在的に利用できる多角形に分割し計算する方法である。BROWN(BROWN, 1965)は個体が利用できる空間は競争木までの距離の半分とみなし、潜在的に個体が利用できる空間を対象木とその競争木を結ぶ線分の垂直二等分線により作られる潜在的利用可能面積(Area potentially available, APA)により定義した。しかしAPAは個体の位置のみにより定められ、個体サイズが考慮されていない。MOOREら(MOOREら, 1973)はBROWNの概念を発展させ、線分の分割位置を断面積により重みづける方法を提唱した。

3. 対象木と競争木の相対直径および樹木間距離を組み込んだ指数(indices incorporating relative diameters and distance between subject tree and competitors); 個体の競争能力は個体サイズに正比例しており、間接的に個体間の距離と比例していると仮定する方法である。SPURR(SPURR, 1962)はピッターリッヒ法の原理を用いて林分の局所密度を求める方法を提案し、これを点密度(point density)とした。HEGYI(HEGYI, 1974)は対象木に対してある一定半径内にある全ての個体を競争木と定義し、樹木間距離により重み付けた対象木直径と競争木直径の比をCIとして用いた。同様にHAMILTON(HAMILTON, 1969)はHEGYIのモデルを拡張し、競争木の選択方法を固定半径ではなく対象木を中心とする一定の角度ゲージ内(angle gauge sweep)で選択された個体

Table 3. 様々なCIの評価とその結果概要

The evaluation of the various competition indices and their effect from the past studies

著者 Author	年 Year	対象種 Species	対象林分 Site	MARTINIS	DANIELS	TOME'S	BINGS'S	MÄKINEN	MINAIS	同部	同部	高田ら	高田ら	岩神ら
Forner 自然の広葉樹林 Spices	1983	Red pine人工林	1986	1984	1989	1989	1992, 1995	1997	2000	1972, 1973	1974	1983	1984	1986
成長予測の指標	直径成長 樹高成長	直径成長 樹高成長	直径成長 樹高成長	直径成長 樹高成長	直径成長 樹高成長	直径成長 樹高成長	直径成長 樹高成長	直径成長	直径成長	直径成長 (樹林林、高樹林)	直径成長 (樹林林、高樹林)	直径成長	直径成長	直径成長 ヒノキ人工林
CIのメーターのタイプ														
Type of the competition indexes														
樹高木サイズ	Competition tree size													
直径木サイズ	Subject tree size													
樹形サイズ	Relative size													
林分密度	Stand density													
樹冠密度	Crown index													
D	Neighbourhood													
I	The sum of angles from subject tree to both sides													
C	The sum of angles from subject tree to competition													
I	The sum of angles from subject tree to competition													
樹幹周囲なし	No competition index													
距離平方反比	Distance													
距離平方反比	Distance-size ratio													
多角形面積	Polygon area													
D	Area overlap													
C	Weighted size ratio													
I	Distance-weighted size difference													
距離平方反比	Distance-weighted crown index													
樹形密度	Stand density													
樹形密度	Relative crown density													
樹形密度	Light angle													
ゾーンカウント法	Zone count													
評価方法	Evaluation methods													
結果	Results													
効果的ICI	Effective CI													
効果的少木ICI	Ineffective CI													



を競争木と定義した。またDANIELら (DANIELS, 1976) もHEGYIの指数にポイントサンプリング法による競争木の選択方法を応用し、年間直径成長との相関を調べた。

以下、CIに関する主要な報告についてTable 3に整理した。

LORIMER (LORIMER, 1983) は同齢の温帯広葉樹林を対象として、CIを開数とした直径成長を回帰式により予測した。その結果、温帯性の広葉樹種からなる天然同齢林において樹木間距離を考慮することは、個体の成長予測を行う上で実質的には有効でないことを報告した。

MARTINら (MARTINら, 1984) はRed pine (*Pinus resinosa* Ait.) 人工林を対象としCIを組み込んだ直径成長モデルおよび樹高成長モデルを考案し、その効果を比較した。その結果、直径成長の推定は断面積密度を組み込んだモデルが優れ、樹高成長の推定は、立木密度を組み込んだモデルが優れていたことを報告した。また、樹高成長は直径成長ほどにはCIをモデルに組み込むことで予測精度は向上しないとされた。

BIGINGら (BIGINGら, 1992; BIGINGら, 1995) は混交針葉樹林を対象として樹高成長および直径二乗成長の予測精度についてDICIとDDCIを比較し、樹冠表面積が成長の予測に重要なDICIであること、樹冠因子を組み込んだDICIは、少なくとも複雑な混交針葉樹林においてはDDCIと同等以上に予測精度が良いことを明らかにした。

MÄKINEN (MÄKINEN, 1997) はScot pine (*Pinus sylvestris* L.) 人工林を対象に直径成長および樹高成長とCIとの相関関係を調べた結果、若齢の人工林でDICIは競争的相互作用を表すために効果的であるとした。また、樹高成長とCIの間には有意な相関はないことを示した。

MIINAら (MIINAら, 2000) はScot pine (*Pinus sylvestris* L.) と Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) 混交林において直径成長を予測する単木距離従属モデルを提示するため、モデルに組み込む最適なDDCIの検討を行った。その結果、最適モデルは対象木の競争木に対する受光角の和で計算されるCIを組み込んだものであることを報告した。

DICIとDDCIの両者を同時にモデルに取り込んだ比較例としてはDANIELSら (DANIELS, 1986)、TOMÉら (TOMÉら, 1989) による報告がある。

また、南雲ら (南雲ら, 1990) によると、我が国におけるこの種のモデルは、高田の受光角モデルに始まり、その後、森田 (森田, 1964; 森田, 1971; 森田, 1972) や小林 (小林, 1975) によって進められた。

小林 (小林, 1975) はカラマツ人工林を対象として生態学的知見と観察結果に基づき、個体の樹冠拡張範囲を定める樹冠占有面積モデルから樹高対直径の相対成長を求め、閉鎖林分と間伐林分における胸高直径成長をシミュレートした。シミュレーションにおいて、樹冠占有面積モデルでは、立木の有効占有半径と樹高から立木間の競争関係を考慮した樹冠占有面積の推定方法を用いており、

樹冠占有面積はBROWNのAPAに比べても十分に生態学的な意味を持つDDCIであるとしている。

阿部 (阿部, 1972; 阿部, 1973; 阿部1974) や高田ら (高田ら, 1983; 高田ら, 1984) は人工林を対象に様々なCIと直径成長との相関関係を調べ、個体自身の大きさと、その競争木の幹の大きさとの相対関係を用いたものが幹の肥大成長への競争効果を現すモデルとして効果的であるとされた。

岩神ら (岩神ら, 1996) はヒノキ人工林においてCIと年輪幅の関係を重回帰分析により解析したところ、胸高直径および陽樹冠長、相対幹距を説明変数とした組み合わせのモデルにおいて、最も高い決定係数が得られたとし、相対幹距という距離因子が幹の肥大成長への有効な影響因子であることを報告した。

これらの知見から以下のことがまとめられる。

- ・DDモデルはDIモデルに比べ単木の競争尺度を組み込む分だけ情報量が多いことから、その予測精度の向上が予想されるが、立木の成長予測に用いられるほとんどのCIに関してDIモデルとDDモデルの間に大きな違いは報告されていないこと。

- ・CIを成長モデルに組み込む効果は、樹高成長に関しては小さく、直径成長に関して有効であること。

- ・直径や断面積などの個体自身のサイズを含むCI、樹冠因子を含むCIは幹の肥大成長を表すのに有効であること。

- ・距離情報のみから構成されるCIは幹の肥大成長への効果は少ないが、距離情報を個体サイズ等へ組み込んだCIの有効性は報告されていること。

上記の記述にも認められるように、樹冠因子は幹の肥大成長を表すのに有効な因子であると考えられる。生態学的には光合成量は樹冠サイズに比例するため、立木の成長に大きく関与するが、一般的に樹冠因子は直径や断面積に比例すると考えられる。そこで現地で測定が困難な因子をさげ、簡便に取得できる情報がCIとして望ましいという見地から、後のCI解析には樹冠因子を取り上げず、直径で代替させるものとした。

### 3.3 個体間競争指数の限界性の検討

個体間の競争指数については、1960年代以降、数多くの指数が考案され、その有効性が検討されてきた。競争指数に競争木の数やサイズ、対象木と競争木との空間配置因子を組み込む効果については、その導入効果は極めて小さく、ほとんどが対象木自身のサイズほど強い相関は持たないとの結果が報告されている。しかしDANIELSら (DANIELSら, 1986)、TOMÉら (TOMÉら, 1989)、岩神ら (岩神ら, 1996) に見られるように、距離を含む競争指数の有効性を報告する例も見られる。

本節では、樹木間距離と樹木サイズに基づく競争指数をいくつか取り上げ、競争指数の効果を考察した。

対象木の成長に影響を与える競争木の選択方法としては、任意の隣接木本数を選択する方法、樹冠を接する樹

木を選択する方法、一定距離内の樹木を競争木とする方法、サンプリング理論を応用する方法等、多々あるが、ここでは、ある個体を中心としてVoronoi多角形を構成する個体をその個体に対する競争木と定義した(長谷川ら, 1986)。Voronoi多角形は、他のどの中心からよりもそれ自身の中心に近い点の集合であり、林分内において相対的に中心個体に近接している個体を選択する方法といえる。その際に、試験地内の外周木は競争指数の計算対象外とした。また、離れている個体同士は競争の影響が少ないと考えられるため(阿部, 1973) 林ら(林ら, 1972)の解析結果を参考とし、ここでは対象木と隣接木との樹木間距離が4 m以上のものを競争木としての計算対象から除外した。解析に用いた競争指数は高田らによる報告、岩神による報告、アフィフらによる報告を参考に下記の12指数とした。

$D_i$ ; 対象木の直径、 $D_j$ ;  $i$ 番目の競争木の直径、  
 $n$ ; 競争木本数、 $L_{ij}$ ; 樹木間距離

1. 直径サイズ; 対象木の直径サイズ

$$D_i$$

2. 直径比 ; 対象木と競争木の直径比の和

$$\sum_{j=1}^n D_j/D_i$$

3. 断面積比 ; 対象木と競争木の断面積比の和

$$\sum_{j=1}^n D_j^2/D_i^2$$

4. 平均距離 ; 対象木から競争木までの平均距離

$$\sum_{j=1}^n L_{ij}/n$$

5. 平均距離(3); 3本目の近接競争木までの平均距離

6. 平均距離(4); 4本目の近接競争木までの平均距離

7. 距離平方距離; 対象木から競争木までの平均距離平方

$$\sum_{j=1}^n L_{ij}^2/n$$

8. 距離重み付け直径比; 各樹木間距離に対する対象木と競争木の直径比の和

$$\sum_{j=1}^n (D_j/D_i)/L_{ij}$$

9. 距離重み付け断面積比; 各樹木間距離に対する対象木と競争木の断面積比の和

$$\sum_{j=1}^n (D_j^2/D_i^2)/L_{ij}$$

10. 多角形面積; 個体とその競争木とを結ぶ線分の垂直

二等分線で囲まれるボロノイ多角形面積

11. 相対幹距 (3);

$$(3 \text{ 本目までの平均樹木間距離}/\text{対象木の樹高}) \times 100$$

12. 相対幹距 (4);

$$(4 \text{ 本目までの平均樹木間距離}/\text{対象木の樹高}) \times 100$$

試験地別に各期間平均直径成長量とそれぞれの競争指数との間の単相関を調べ、Table 4、Table 5 に示した。単相関が高いほど、直径成長への寄与率が高いことを示している。距離に関する指数である平均距離、平均距離(3)、平均距離(4)、平均平方距離および多角形面積は、小野子試験地の方が高萩試験地よりも高い値を示したが、多角形面積を除いた指数は直径成長に大きな寄与はしていない。

両試験地において距離を組み込んだ指数に比較し高い相関を示したのは直径比や断面積比等の直径サイズを組み込んだ指数であった。また、これらの指数と林齢の間に明瞭な傾向は見られず、林齢による変化はないものと考えられた。どちらの試験地にも間伐の有無による競争指数の差異は顕著に見られなかった。

以上のことから、高田ら(高田ら, 1983)の指摘にも見られるように、直径成長には隣接木との空間配置関係は大きな影響を与えておらず、その樹木自身のサイズによる自己相関的な影響が強く働いていると推察される。

小野子試験地において直径成長と距離因子との相関が0.2~0.3程度はあることから距離因子が直径成長へ寄与している可能性は否定できない。しかし、通常、人工林においては、その寄与は、樹木自身のサイズによる自己相関に比べると小さく、単木の競争関係を距離=占有空間の変化のみからでは説明できないことがわかった。

### 3.4 個体成長と地形条件との関係

川崎は(川崎, 1991)林分内で樹木の成長パターンと環境因子との関係を見た場合に、尾根付近と沢すじ、あるいは同一斜面内の上部と下部とでは、成長差が明らかに見られるとしている。また、森貞(森貞ら, 1987)もその報告の中で一斜面程度の狭い範囲では微地形や傾斜などの地形条件が成長に關与する可能性を報告している。これまで樹木成長と地形条件關する研究では数値等で定量化した地形条件と成長との関係を明らかにする研究(森貞ら, 1987; 森貞ら, 1989; 沢田ら, 1989)が行われている。しかし単木レベルでは局所的な地形条件の測定の高難さから単木成長と地形条件との関係を表すほどの詳細な情報が整備されていないため、研究例はほとんどない。

前節では個体成長と競争指数の関係を解析し、個体成長には、樹木自身のサイズによる自己相関が大きく關与していることを明らかにした。本節では、地形条件が個体成長にどの程度影響を与えているか明らかにするため、傾斜、斜面方位、斜面型といった地形条件に着目して、個

Table 4. 直径成長と競争指数の相関関係  
Correlations between the average diameter increment and the competition indices

小野子試験地 Onoko experimental plot		競争指数 Competition indices											
間伐区 Thinned plot		直径	直径比	断面積比	平均距離	平均距離(3)	平均距離(4)	平均平方距離	距離重み付け直径比	距離重み付け断面積比	多角形面積	相対幹距(3)	相対幹距(4)
期間	Period	Diameter	Diameter ratio	Basal area ratio	Mean distance	Mean distance(3)	Mean distance(4)	Square mean distance	Distance-weighted diameter ratio	Distance-weighted basal area ratio	Polygon area	Relative spacing(3)	Relative spacing(4)
14-17	14-17	0.53 **	-0.56 **	-0.55 **	0.34 **	0.36 **	0.26 **	0.33 **	-0.59 **	-0.60 **	0.45 **	-0.12	-0.19 **
17-19	17-19	0.31 **	-0.32 **	-0.26 **	0.18 **	0.11	0.10	0.18 **	-0.32 **	-0.31 **	0.35 **	-0.08	-0.07
19-22	19-22	0.52 **	-0.50 **	-0.49 **	0.25	0.28 **	0.29 **	0.25	-0.51 **	-0.55 **	0.38 **	-0.10	-0.11
22-24	22-24	0.36 **	-0.36 **	-0.34 **	0.22 **	0.38 **	0.33 **	0.21 **	-0.44 **	-0.38 **	0.40 **	0.25 **	0.19 *
24-27	24-27	0.47 **	-0.31 **	-0.37 **	0.27 **	0.32 **	0.32 **	0.26 **	-0.40 **	-0.41 **	0.33 **	0.11	0.10
27-29	27-29	0.54 **	-0.46 **	-0.45 **	0.22 **	0.36 **	0.31 **	0.21 **	-0.48 **	-0.48 **	0.45 **	0.15	0.08
29-34	29-34	0.41 **	-0.28 **	-0.31 **	0.20 **	0.27 **	0.27 **	0.19 **	-0.34 **	-0.34 **	0.30 **	0.08	0.06
34-40	34-40	0.28 **	-0.11	-0.21 **	0.18 *	0.16 *	0.18 *	0.17 *	-0.22 **	-0.28 **	0.11	0.05	0.07
40-44	40-44	0.43 **	-0.23 **	-0.34 **	0.16	0.15	0.15	0.15	-0.28 **	-0.35 **	0.08	-0.06	-0.05
44-49	44-49	0.53 **	-0.23 **	-0.33 **	-0.02	0.01	-0.03	-0.04	-0.26 **	-0.34 **	0.31 **	-0.11	-0.16
49-54	49-54	0.69 **	-0.54 **	-0.59 **	0.26 *	0.36 **	0.26 *	0.24 *	-0.61 **	-0.63 **	0.54 **	0.17	0.06
平均	Average	0.46	-0.35	-0.38	0.21	0.25	0.23	0.19	-0.41	-0.42	0.33	0.03	0.00
標準偏差	Standard deviation	0.12	0.15	0.12	0.09	0.12	0.11	0.09	0.14	0.12	0.14	0.13	0.12
		* : P<0.05 , ** : P<0.01											
無間伐区 Unthinned plot		競争指数 Competition indices											
期間	Period	直径	直径比	断面積比	平均距離	平均距離(3)	平均距離(4)	平均平方距離	距離重み付け直径比	距離重み付け断面積比	多角形面積	相対幹距(3)	相対幹距(4)
14-17	14-17	0.47 **	-0.52 **	-0.51 **	0.32 **	0.33 **	0.35 **	0.31 **	-0.59 **	-0.56 **	0.33 **	-0.15 **	-0.14 **
17-19	17-19	0.15 **	-0.28 **	-0.26 **	0.20 **	0.16 **	0.24 **	0.20 **	-0.31 **	-0.28 **	0.25 **	0.03	0.03
19-22	19-22	0.34 **	-0.47 **	-0.47 **	0.19 **	0.18 **	0.20 **	0.18 **	-0.48 **	-0.49 **	0.20 **	-0.16 **	-0.15 **
22-24	22-24	0.42 **	-0.48 **	-0.45 **	0.23 **	0.23 **	0.27 **	0.22 **	-0.49 **	-0.46 **	0.31 **	-0.12 **	-0.10 **
24-27	24-27	0.60 **	-0.46 **	-0.48 **	0.26 **	0.29 **	0.29 **	0.25 **	-0.46 **	-0.44 **	0.29 **	-0.22 **	-0.23 **
27-29	27-29	0.57 **	-0.52 **	-0.49 **	0.17 **	0.21 **	0.23 **	0.17 **	-0.49 **	-0.46 **	0.26 **	-0.24 **	-0.24 **
29-34	29-34	0.54 **	-0.47 **	-0.46 **	0.14 **	0.11 **	0.14 **	0.14 **	-0.45 **	-0.41 **	0.13 **	-0.26 **	-0.25 **
34-40	34-40	0.37 **	-0.38 **	-0.38 **	0.03	0.05	0.04	0.04	-0.38 **	-0.38 **	0.04	-0.18 **	-0.19 **
40-44	40-44	0.37 **	-0.33 **	-0.38 **	-0.02	-0.09 *	-0.10 *	-0.02	-0.31 **	-0.37 **	-0.10 **	-0.27 **	-0.28 **
44-49	44-49	0.69 **	-0.54 **	-0.58 **	0.14 **	0.19 **	0.14 **	0.14 **	-0.52 **	-0.57 **	0.18 **	-0.02	-0.21 **
49-54	49-54	0.49 **	-0.02	-0.02	0.20 **	0.21 **	0.19 **	0.20 **	0.04	0.03	0.26 **	-0.03	-0.05
平均	Average	0.46	-0.40	-0.41	0.17	0.17	0.18	0.17	-0.40	-0.40	0.20	-0.15	-0.16
標準偏差	Standard deviation	0.15	0.16	0.16	0.10	0.12	0.12	0.09	0.17	0.17	0.13	0.10	0.10
		* : P<0.05 , ** : P<0.01											

Table 5. 直径成長と競争指数の相関関係  
Correlations between the average diameter increment and the competition indices

上野田試験地 Kamikimita experimental plot												
間伐区 Thinned plot												
平均直径成長量 The average diameter increment												
競争指数 Competition indices												
期間 Period	直径 Diameter	直径比 Diameter ratio	断面積比 Basal area ratio	平均距離 Mean distance	平均距離(3) Mean distance(3)	平均距離(4) Mean distance(4)	平均平方距離 Square mean distance	距離重み付け直径比 Distance-weighted diameter ratio	距離重み付け断面積比 Distance-weighted basal area ratio	多角形面積 Polygon area	相対幹距(3) Relative spacing(3)	相対幹距(4) Relative spacing(4)
48-53	0.42 **	-0.31 **	-0.39 **	0.04	0.14 **	0.14 **	0.05	-0.33 **	-0.40 **	-0.02	-0.09 *	-0.13 **
53-58	0.56 **	-0.41 **	-0.50 **	0.12 **	0.10 **	0.13 **	0.12 **	-0.42 **	-0.50 **	0.08 *	-0.10 **	-0.15 **
58-63	0.34 **	-0.35 **	-0.47 **	0.14 **	0.09 *	0.13 **	0.15 **	-0.38 **	-0.49 **	0.08 *	-0.15 **	-0.19 **
63-69	0.50 **	-0.26 **	-0.38 **	0.00	0.11	0.09	0.00	-0.24 **	-0.35 **	-0.02	-0.12	-0.25
69-73	0.52 **	-0.29 **	-0.38 **	-0.06	-0.04	-0.21	-0.07	-0.26 **	-0.35 **	0.05	-0.19 *	-0.38 *
73-77	0.55 **	-0.26 **	-0.33 **	0.02	-0.02	0.11	0.03	-0.25 **	-0.31 **	0.16	-0.13	-0.21
平均	0.48	-0.32	-0.41	0.04	0.06	0.07	0.04	-0.32	-0.40	0.05	-0.13	-0.22
Average	0.09	0.06	0.06	0.08	0.07	0.14	0.08	0.08	0.08	0.07	0.04	0.09
標準偏差	* : P<0.05 , ** : P<0.01											
Standard deviation												
無間伐区 Unthinned plot												
平均直径成長量 The average diameter increment												
競争指数 Competition indices												
期間 Period	直径 Diameter	直径比 Diameter ratio	断面積比 Basal area ratio	平均距離 Mean distance	平均距離(3) Mean distance(3)	平均距離(4) Mean distance(4)	平均平方距離 Square mean distance	距離重み付け直径比 Distance-weighted diameter ratio	距離重み付け断面積比 Distance-weighted basal area ratio	多角形面積 Polygon area	相対幹距(3) Relative spacing(3)	相対幹距(4) Relative spacing(4)
48-53	0.48 **	-0.40 **	-0.41 **	0.01	0.05	0.02	-0.05	-0.41 **	-0.43 **	0.04	-0.27 **	-0.30 **
53-58	0.56 **	-0.43 **	-0.45 **	-0.05	0.04	0.08	-0.05	-0.43 **	-0.46 **	0.06	-0.26 **	-0.25 **
58-63	0.39 **	-0.42 **	-0.49 **	0.03	0.08	0.08	0.03	-0.43 **	-0.50 **	-0.02	-0.22 **	-0.25 **
63-69	0.57 **	-0.45 **	-0.51 **	0.01	0.08	0.09	0.01	-0.46 **	-0.53 **	0.08	-0.15 *	-0.17 *
69-73	0.64 **	-0.45 **	-0.52 **	0.08	0.10	0.08	0.09	-0.46 **	-0.55 **	-0.09	-0.13 **	-0.19 **
73-77	0.63 **	-0.25 **	-0.28 **	0.00	0.05	-0.02	0.01	-0.25 **	-0.29 **	0.13	-0.06	-0.07
平均	0.54	-0.40	-0.44	0.01	0.07	0.06	0.00	-0.41	-0.46	0.03	-0.18	-0.20
Average	0.09	0.08	0.09	0.04	0.02	0.04	0.05	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08
標準偏差	* : P<0.05 , ** : P<0.01											
Standard deviation												

体成長と地形条件との関係を数量化 類により検討した。

解析対象は上君田試験地の無間伐試験区 (30m × 50mの2区) である。両試験区は同一施業同一林分であることから、解析時には1試験区として扱った。両試験区に対しては試験地設定以後は間伐、除伐等の保育作業は行われていない。解析資料として、48年生 (1967年)、77年生 (1996年) 測定データおよび、LIDAR計測データから算出した地盤高Digital Elevation Model (以下DEM) (平田ら, 2001) を使用した。

0.5m格子間隔 (以下セル) の地盤高DEMから地理情報システムTNTMipsを用いて、斜面方位、傾斜度、堆積度、斜面型、立木斜面位置を地形条件として算出した。各項目の算出方法は以下の通りである。斜面方位：各セルの斜面方向を45度ずつの8方位に区分。傾斜度：各セルに直交する隣接4セルの標高から以下の式で算出。傾斜度 = arc tan ( (x<sup>2</sup> + y<sup>2</sup>) ) x : x方向の標高差、y : y方向の標高差。堆積度：斜面上において各セル位置に水分や養分を供給していると考えられる上方斜面の累積セル数を地形形状の解析から算出し、堆積度とした。斜面型：近接8セルの標高との比較から、各セルを凸型、凹型に区分。斜面位置：斜面上の立木の位置を次の式で算出。(立木位置DEM値 - 斜面の最低DEM値) / (斜面の最高DEM値 - 最低DEM値)。

斜面方位、傾斜度、堆積度については立木位置から半径1.75mの円内にあるセル値の平均値を求め、斜面型と立木斜面位置については立木位置のセル値を求め、それ

ぞれの立木がもつ地形条件の値とした。

外的基準を48年生年および77年生の樹高および直径とし、説明変数 (以下アイテム) にそれぞれの地形条件を用い、Table 6のようにカテゴリー区分を行い、数量化類 (駒澤ら, 1998) により分析を行った。77年生の樹高データは毎木ではなく標本木測定データを使用した。

上記の地形条件を用いて樹高推定を行った結果、重相関係数0.679、寄与率46.0%を得た。アイテムのレンジを見ると、48年生時、77年生時ともに斜面位置が最も高いレンジを示し、スコアも斜面下部ほど高く上部ほど小さい明瞭な傾向を示していた。斜面型や傾斜度は低いレンジを示した。直径については重相関係数で0.379、寄与率14.3%であり両者の間に明確な関係を見ることはできなかった (Table 7)。また各アイテムのレンジ、スコアも明らかな傾向を示さなかった。

77年生の樹高データが少ないという問題点はあるが、直径と樹高を比較した場合、樹高は地形条件に影響を受けるが、直径は地形条件に影響されないと考えられる。沢田 (沢田, 1989) は直径と地形条件との関係を数量化類により解析し、重相関係数0.5008、寄与率25.08%という結果を報告した。この報告を鑑みても地形条件と直径との間には強い相関がないと考えられる。

#### 4 総合的考察

本稿では、固定標準地のデータを用いて樹木個体の分布パターンの時系列変化、個体間の成長競争関係を表す

Table 6. 地形条件を説明変数とする数量化 類による分析結果 (樹高)  
Results of quantification method I using the topography conditions as a explanatory variate

外的基準が48年生樹高の場合 External criterion : height of 48 tree age					
アイテム Item	カテゴリ Category	頻度 Frequency	スコア Score	レンジ Range	偏相関係数 Partial correlation coefficient
斜面方位 Aspect	1 : 北東	50	0.456	4.918	0.487
	2 : 東	111	2.153		
	3 : 南東	139	1.061		
	4 : 南	148	-2.766		
傾斜度(°) Slope	1 : ~20	71	-0.797	1.597	0.143
	2 : ~25	109	-0.408		
	3 : ~30	120	0.217		
	4 : ~35	104	0.383		
	5 : ~40	44	0.801		
堆積度 Sedimentation degree	1 : ~100	352	-0.221	1.624	0.179
	2 : ~1000	75	1.167		
	3 : 1001 ~	21	-0.458		
斜面型 Slope form	1 : 凸型	239	-0.271	0.582	0.094
	2 : 凹型	209	0.310		
斜面位置 Potision on the slope	1 : ~0.3	92	2.816	5.182	0.506
	2 : ~0.4	83	1.912		
	3 : ~0.5	56	-0.221		
	4 : ~0.6	128	-1.522		
	5 : ~0.7	89	-2.366		
重相関係数 Multiple correlation coefficient	0.651				
寄与率(%) Proportion	0.424				

注.) 頻度は各カテゴリーに含まれる対象木の本数を示す。

外的基準が77年生樹高の場合 External criterion : height of 77 tree age					
アイテム Item	カテゴリ Category	頻度 Frequency	スコア Score	レンジ Range	偏相関係数 Partial correlation coefficient
斜面方位 Aspect	1 : 北東	10	-0.679	1.981	0.618
	2 : 東	15	1.302		
	3 : 南東	25	-0.124		
	4 : 南	22	-0.438		
傾斜度(°) Slope	1 : ~20	14	-0.302	1.249	0.320
	2 : ~25	22	-0.286		
	3 : ~30	14	0.674		
	4 : ~35	17	0.234		
	5 : ~40	5	-0.575		
堆積度 Sedimentation degree	1 : ~100	51	0.089	2.486	0.187
	2 : ~1000	14	0.613		
	3 : 1001 ~	7	-1.873		
斜面型 Slope form	1 : 凸型	31	-0.596	1.046	0.295
	2 : 凹型	41	0.451		
斜面位置 Potision on the slope	1 : ~0.3	25	2.158	4.538	0.242
	2 : ~0.4	12	0.343		
	3 : ~0.5	12	-1.399		
	4 : ~0.6	10	-2.381		
	5 : ~0.7	13	-1.343		
重相関係数 Multiple correlation coefficient	0.679				
寄与率(%) Proportion	0.460				

注.) 頻度は各カテゴリーに含まれる対象木の本数を示す。

Table 7. 地形条件を説明変数とする数量化 Ⅰ 類による分析結果 (直径)  
Results of quantification method I using the topography conditions as an explanatory variate

外的基準が48年生直径の場合

External criterion : diameter of 48 tree age

アイテム	カテゴリ	頻度	スコア	レンジ	偏相関係数
Item	Category	Frequency	Score	Range	Partial correlation coefficient
斜面方位 Aspect	1: 北東	50	1.294	5.253	0.245
	2: 東	111	1.982		
	3: 南東	139	1.435		
	4: 南	148	-3.271		
傾斜度(°) Slope	1: ~20	71	-0.792	1.917	0.333
	2: ~25	109	-0.761		
	3: ~30	120	0.458		
	4: ~35	104	1.124		
	5: ~40	44	-0.743		
堆積度 Sedimentation degree	1: ~100	352	-0.259	4.696	0.124
	2: ~1000	75	1.977		
	3: 1001~	21	-2.719		
斜面型 Slope form	1: 凸型	239	-0.147	0.315	0.172
	2: 凹型	209	0.168		
斜面位置 Position on the slope	1: ~0.3	92	2.191	4.684	0.026
	2: ~0.4	83	0.907		
	3: ~0.5	56	0.395		
	4: ~0.6	128	-2.494		
	5: ~0.7	89	0.228		
重相関係数 Multiple correlation coefficient 寄与率(%) Proportion	0.379				
	0.143				

注.) 頻度は各カテゴリに含まれる対象木の数を示す。

外的基準が77年生直径の場合

External criterion : diameter of 77 tree age

アイテム	カテゴリ	頻度	スコア	レンジ	偏相関係数
Item	Category	Frequency	Score	Range	Partial correlation coefficient
斜面方位 Aspect	1: 北東	31	0.881	2.256	0.304
	2: 東	79	0.824		
	3: 南東	87	0.265		
	4: 南	84	-1.374		
傾斜度(°) Slope	1: ~20	44	-1.784	3.881	0.119
	2: ~25	72	-0.202		
	3: ~30	73	1.246		
	4: ~35	66	1.069		
	5: ~40	26	-2.635		
堆積度 Sedimentation degree	1: ~100	216	0.053	7.255	0.165
	2: ~1000	52	1.274		
	3: 1001~	13	-5.981		
斜面型 Slope form	1: 凸型	151	-0.009	0.020	0.180
	2: 凹型	130	0.011		
斜面位置 Position on the slope	1: ~0.3	59	4.148	7.785	0.001
	2: ~0.4	48	0.647		
	3: ~0.5	34	0.212		
	4: ~0.6	81	-3.637		
	5: ~0.7	59	0.195		
重相関係数 Multiple correlation coefficient 寄与率(%) Proportion	0.336				
	0.113				

注.) 頻度は各カテゴリに含まれる対象木の数を示す。

個体間競争指数の限界、地形条件と個体成長との関係について論じてきた。これらの解析結果を要約すると以下のようなになる。

人工林の自然状態では競争に負けた枯損木は一定間隔で生じ、個体の分布パターンは一様分布を保つため、個体間競争のみでは空間分布パターンを変化させるほど大きな影響はもたないことがわかった。また、間伐という人為インパクトにより、個体は隣接木との距離関係に影響を受け、個体の占有空間量は変化する。だが、占有空間量の変化が成長量の変化に与える効果は、個体自身もつ直径や断面積といった自己サイズによる影響と比較すると小さいことが明らかになった。また、樹木は斜面上の位置や斜面方位といった地形条件によりその樹高サイズに影響を受けるが、直径サイズは地形条件に影響を受けないことが示された。これらのことより、樹木個体の直径成長には個体そのものが持つ遺伝的特性や個体自身のサイズによる自己相関が強い影響を与えていると結論づけられる。

上記の結果から、個体自身の持つサイズが将来の成長量に影響を与えており、個体間にある程度の差がついた後では、徐伐や間伐により個体の占有空間を増やしても、残存木の成長を等しく促進させることは困難であり、小径木の成長は大径木の成長ほどは促進されないことが明らかになった。

なお、本稿で対象とした林分は林齢14年生以上であり、14年生未満の林分については検討を行っていない。その

ため、競争が始まる前の段階において成長が遺伝的特質や自己相関にどの程度影響されるのか確認していないという問題点がある。このため競争が始まる前段階で遺伝的特質や自己相関の成長への影響を明らかにすることで個体の成長特性がさらに理解され、立木レベルでの林分の取り扱いに有用な情報が与えられると考えられる。

#### 謝辞

本論文をまとめるに当たり森林総合研究所 資源解析研究室長 家原敏郎氏にご指導、ご助言を頂いた。また、森林総合研究所四国支所 流域森林保全研究グループ長 平田泰雅氏にはLIDARによる調査資料を提供して頂いた。さらに、鹿児島大学 西川匡英氏には貴重な文献資料を提供して頂いた。そして、数十年に及ぶ調査資料の測定収集ならびに取り纏めを行ってきた歴代資源解析研究室の方々、以上の方々に深く謝意を表します。

#### 引用文献

- 阿部信行(1972) カラマツ幼齡林分における単木の胸高直径成長量と隣接木の距離との関係, 北林試報, 10, 1-10  
 阿部信行(1973) カラマツ林分における単木の胸高直径成長量と隣接木の距離との関係, 北林試報, 11, 77-88  
 阿部信行(1974) カラマツ林分における単木の直径成長量に及ぼす周囲密度の影響, 北林試報, 12, 13-24  
 BELLA, I. E. (1971) A new competition model for

- individual trees, *For. Sci.*, **17**, 364-372
- BIGING, G. S. and DOBBERTIN, M. (1992) A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees, *For. Sci.*, **38**(3), 695-720
- BIGING, G. S. and DOBBERTIN, M. (1995) Evaluation of competition indices in individual tree growth models, *For. Sci.*, **41**(2), 360-377
- BROWN, G. S. (1965) Point density in stems per acre, *New Zealand For. Res. Note No.38*.
- DANIELS, R. F. (1976) Simple indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth, *For. Sci.*, **22**, 454-456.
- DANIELS, R. F., BURKHART, H. E. and CLASON, T. R. (1986) A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees, *Can. J. For. Res.*, **16**, 1230-1237.
- HAMILTON, G. J. (1969) The dependence of volume increment of individual trees on dominance, crown dimensions, and competition, *Forestry.*, **42**, 133-144.
- 長谷川政美・種村正美 (1986) なわばりの生態学, 東海大学出版界, p.67
- 林重佐・酒井寛一 (1972) スギの生長と個体間競争, *日林誌*, **54**(7), 218-225
- HEGYI, F. (1974) A simulation model for managing jack-pine stands. P.74-90 in *Growth models for tree and stand simulation*, J. Fries (ed.). Royal Coll. For., Res. Notes30, Stockholm.
- 平田泰雅・宮本麻子・李雲慶・秋山秀幸 (2001) IKONOS 衛星データによる林分密度の抽出 - ヘリ搭載型 LIDAR 計測結果との比較 -, *リモートセンシング学会秋季学術講演集*, **31**, 231-232
- H. F. ヒルミ (1965) 森林の生物物理学理論, 新科学文献刊行会, p.119
- 家原敏郎 (1991) 数理モデルによる森林成長の樹種・地域特性の解明 ( ) - 関西地域における直径分布の地域・施業特性 -, *日林論*, **102**, 157-158
- 猪瀬光雄 (1984) トドマツの単木成長モデル ( ) 樹高成長量とその変動の経年変化, *日林誌*, **66**, 157-159
- 石橋整司・柴野伸策・高橋康夫 (1989) 天然林における樹木の分布様式, *日林誌*, **71**(12), 503-510
- 岩神正朗・柴山善一郎・松恵恵吾 (1996) ヒノキ人工林における周囲密度環境の年輪形成への影響, *日林論*, **107**, 423-426
- 川崎圭造 (1991) 同一斜面上におけるカラマツの成長差, *日林中支論*, **39**, 57-58
- 菊沢喜八郎 (1988) 若いダケカンバ林の本数・材積の推移, *光珠内季報*, **73**, 11-15
- 北元敏夫・四手井綱英 (1972) 林木の空間分布の研究 ( ) 人工一斉林における優勢木、劣勢木の分布, *京大演報*, **43**, 152-161
- 木梨謙吉・柿原道喜 (1981a) 人工林の直径分布について ( ) 間伐によるワイブルパラメーター  $c$  の変化, *日林九支論*, **34**, 35-36
- 木梨謙吉 (1974) Growth model について, *日林講*, **85**, 61-62
- 木梨謙吉・柿原道喜 (1981b) 人工林の直径分布について ( ) 間伐直前直後および一定期間後の分布の傾向, *日林論*, **92**, 103-105
- 小林正吾 (1975) カラマツ人工林の林分成長モデルに関する研究, *北林試報*, **15**, 1-164
- 駒澤勉・橋口捷久・石崎龍二 (1998) 新版パソコン数量化分析, 朝倉書店, 280p.
- LORIMER, C. G. (1983) Tests of age-independent competition indices for individual trees and natural hardwood stands, *For. Ecol. Manage.*, **6**, 343-360.
- MÄKINEN, H. (1996) Possibilities of competition indices to describe competitive differences between Scots pine families, *Silva Fennica.*, **31**(1), 43-52
- 松本光朗 (1991) 数理モデルによる森林成長の樹種・地域特性の解明 ( ) - 九州地方人工林における直径分布の特性 -, *日林論*, **102**, 153-154
- 松村直人・吉田実・高橋文敏 (1991) 数理モデルによる森林成長の樹種・地域特性の解明 ( ) - 四国地方固定試験地における直径分布の推移 -, *日林論*, **102**, 155-156
- MARTIN, G. L. and EK, A. R. (1984) A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth, *For. Sci.*, **30**(3), 731-743
- MIINA, J. and PUKKALA, T. (2000) Using numerical optimization for specifying individual-tree competition mode, *For. Sci.*, **46**(2), 277 ~ 283
- 水永博己 (1983) 間伐と枝打ちを伴うスギ人工林の生態学的個体生長モデルに関する研究 ( ) - 大きさ別の個体分布パターンについて (予報), *日林関西講*, **34**, 128-131
- MOEUR, M (1993) Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data, *For. Sci.*, **39**(4), 756-775
- MOORE, J. A., BUDELSKY, C. A. and SCHLESINGER, R. C. (1973) A new index representing individual tree competitive status, *Can. J. For. Res.*, **3**, 495-500
- 森貞和仁・堀田庸・川添強・長友忠行 (1987) シイの生長と地形条件の関係 - シイの地位指数推定の試み -, *日林論*, **98**, 175-176
- 森貞和仁・堀田庸・川添強・長友忠行 (1989) 微地形条件からみた佐伯イチイガシ林の成長について, *日林九支論*, **42**, 187-188
- MORISITA, M. (1959) Measuring of the dispersion of

- individual s and analysis of the distributional pattern,  
Mem. Fac. Sci. Kyusyu Univ. Ser. E (Biol.) **2**, 215-235
- 森田栄一 (1964) ヒノキ林における間伐木選定の一方法について, 日林九支講, **20**, 73-74
- 森田栄一 (1971) 間伐率の変化にともなう成長予測 ( ) - コンピュータによる立木位置図の作成 - , 日林九支論, **25**, 16-17
- 森田栄一 (1973) 間伐率の変化にともなう成長予測 ( ) - 現在直径・立木密度と将来直径の関係解析 - , 日林九支論, **26**, 33-34
- 南雲秀次郎・箕輪光博 (1990) 現代林学講義10測樹学, 地球社, p.151
- E. P. オダム (1971) 生態学, 築地書館, p.278
- OPIE, J. E. (1968) Predictability of individual tree growth using various definitions of competing basal area, For. Sci., **14** 314-323
- 林野庁 (1997) 間伐の手引き, 日本林業技術協会, p.13
- RUCHAEMI, A., IWAKAMI, S. and SAKAMOTO, T. (1982) The individual tree growth in competitive conditions, Bull. Kochi Univ. Forest, **9**, 53-89
- 沢田晴雄・斉藤登・斉藤俊浩・梶幹男・山根明臣 (1989) 76年生ケヤキ人工林の成長と地形条件との関連について, 日林論, **100**, 271-272
- 清和研二 (1982) トドマツ人工林における大きな個体の分布様式について, 日林北支講, **31**, 12-13
- 清和研二・菊沢喜八郎 (1987) トドマツ人工林における樹木の大きさごとの空間分布の林齢にともなう変化, 日林誌, **69**(12), 465-471
- SPURR, S. H. (1962) A measure of point density, For. Sci., **8**, 85-96.
- 高田和彦 (1983) 最終回の間伐以後のスギ林分における直径および断面積成長量と競争因子の関係, 日林誌, **65**(4), 113-118
- 高田和彦・小林正吾 (1984) トドマツ林分における胸高直径成長量と競争因子の関係, 林統研試, **9**, 1-4
- TOMÉ, J. M. and BURKHART, H. E. (1989) Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees, For. Sci., **35**(3), 816 ~ 831