

## 立木の競争指標の評価方法

### Testing the method for evaluation of a competition effect among trees

塙谷大介<sup>\*1</sup>・太田敬之<sup>\*1</sup>・正木隆<sup>\*1</sup>・梶本卓也<sup>\*1</sup>

Daisuke KABEYA<sup>\*1</sup>, Hiroyuki OTA<sup>\*1</sup>, Takashi MASAKI<sup>\*1</sup> and Takuya KAJIMOTO<sup>\*1</sup>

\*1 森林総合研究所

FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687

**要旨**：非対称的競争の強さを表す指標の一つとして、対象木より樹高の高い個体（優位個体）の胸高断面積を積算したBALがある。しかしながらBALは対象木のサイズに強く依存する指標であり、個体サイズが大きいほどBALは小さくなる。このため成長速度に対する個体サイズの直接的効果（例えば同化器官量）と間接的効果（競争への有利性）との分離が難しい。そこで本研究では、確率化テストを行うことでBALと成長速度の関係のうち、競争の影響のみを評価できるかどうか検証した。その結果、変量のうち個体の樹高（サイズ指標）・成長速度を固定した状態で空間配置を無作為化することで、BALと成長速度の相関係数について、空間配置（競争効果）の影響がないとする帰無仮説を棄却可能な区間が得られた。これと比較することで、実際のヒノキ林分においても特定の競合木探索範囲において競争効果による成長速度低下の影響が検出された。

**キーワード**：非対称的競争、局所的競争、ヒノキ、確率化テスト

**Abstract:** BAL (basal area of larger trees than focal tree) is an indicator of the magnitude of asymmetric competition effect of neighborhood trees in the forest stand. BAL strongly depends on the height of focal trees, and hence the relationship between BAL and growth rate involves not only the effect of competition, but also direct effect of focal tree size (e.g., greater amount of leaves and roots). In this study, we tested the validity of randomization test to evaluate the relationship between BAL and growth rate in terms of asymmetric competition. Randomization of tree location could estimate appropriate range of the correlation coefficient between growth rate and BAL which indicated a significant difference from the null-hypothesis. The correlation coefficient within the range indicated that growth of the focal tree was affected by competition with around trees. Furthermore, the correlation coefficient range of neighbor-seek in timber forests showed remarkably lower than null-hypothesis. This result suggests that the growth rate of the trees is affected negatively by the existence of dominant neighbors within a distinct range.

**Keywords:** asymmetric competition, local interference, *Chamaecyparis obtusa*, randomization test

#### I はじめに

資源をめぐる樹木の競争は、個体の成長を規定する大きな要因の一つである。競争の程度を表す指標は数多く検討されているが（たとえば（1）），そのなかの一つに断面積合計（BA）がある。また光を巡る競争は一方的競争であると考えられるため、対象木よりもサイズの大きい（優位の）個体の断面積合計BALが一方的競争の影響を表現する指標として用いられている（1, 2, 4, 9）。正木ら（5）は、対象木からの競合木探索範囲を変更しながらBALを計算し、成長速度との関係（相関関係）を評価することで、競争を緩和できる個体間距離の推定に有効であると論じている（図-1）。

しかしながら一方的競争の指標は、個体サイズに関する情報を内包していることが多い。たとえば競合木探索

範囲 $r$ におけるBALを計算する場合、対象木を降順のサイズ順位 $i$ 番目の個体 $T_i$ とすると、 $T_i$ からの距離 $r$ 以内にあり、かつ $T_i$ より優位の個体の胸高断面積を積算することで $T_i$ のBALが得られる。すなわち、 $T_i$ より優位の個体の個体数（=サイズ順位の高い個体の個体数）がBALの重要な要素となる。ここで、個体 $T_i$ から半径 $r$ 内に存在する $T_i$ より優位の個体の個体数の期待値は、

$$\hat{N}_i = (i-1) \times \frac{\pi r^2}{S} \quad \dots(I)$$

となり、サイズ順位に依存することが判る。ここで $S$ はプロットの面積である。サイズ順位は個体の空間配置、すなわち個体間競争に非依存の数値であり、個体サイズの逆数でもある。このため、個体サイズと成長速度に正

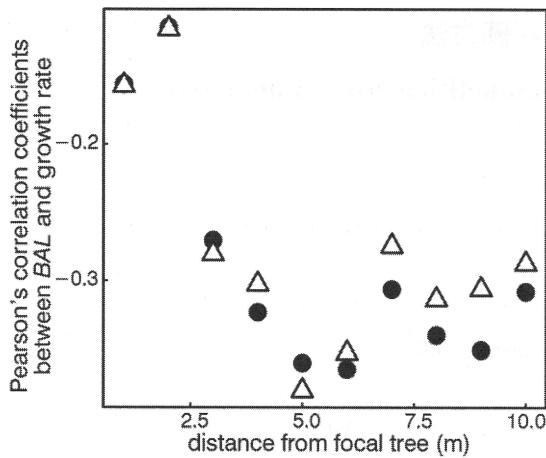


図-1. 競合木探索範囲の変化にともなう BAL と成長速度の相関係数の変化。道木橋ヒノキ林のデータを元に計算。

●は BAL 計算時に樹高をもとに個体の優劣を判定した場合、△は頂端位置（樹高+標高）をもとに個体の優劣を判定した場合の相関係数

Fig. 1 Correlation coefficients between BAL and the growth rate of the focal tree in several distances of neighbor-seek range. ●: BAL were estimated from the real tree height, △: BAL were estimated from the position of a treetop (tree height + altitude of the tree base).

の相関がみられる場合、サイズ順位と成長速度との間には負の相関がみられる（図-2）。このようにBALと成長速度の関係を相関係数で評価する場合、必ずサイズ順位と成長速度との関係を内包する。その結果、たとえ競争の効果がなくてもBALと成長速度とは負の相関を示す可能性が存在する。従って、BALを指標として個体間の非対称的競争を評価するには、無相関を帰無仮説とする相関係数の有意性の検定では適当ではない。また近接個体との相互関係を解析する場合、全ての個体が対象個体にも競争相手にもなるため各データの独立性が保証されない。この点からもパラメトリックな統計解析による検証は適当ではない（4, 6）。そこで本研究では、個体サイズの直接影響を除外したBALと成長の関係を評価する手法について、パラメトリックな統計解析に替わる確率化テストの利用およびその妥当性を検討した。

## II 方法

本研究では、個体間競争の点でBALと成長速度の関係を評価するための手法として確率化テスト（randomization test）（8）を採用した。計算手順として、まずBALの計算に必要な変数のうち樹高（樹高順位）、個体配置（個体間距離）、および応答変数である成長速度の3変数の組み合わせの一部を並べ替えてさまざまな競合個体探索範囲でのBALと成長速度の相関係数を計算し、分布範囲を推定した。そのうえで、帰無仮説の分布

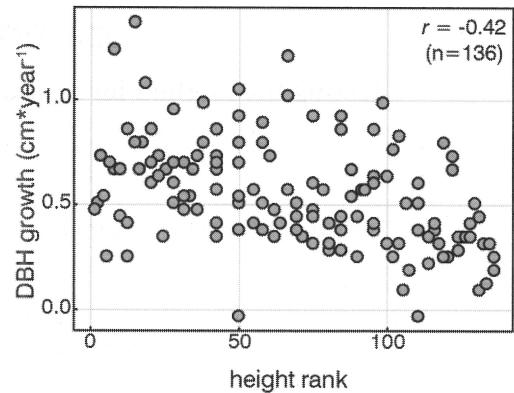


図-2. 樹高順位と成長速度の関係。道木橋ヒノキ林のデータに基づく

Fig. 2 Relationships between DBH growth rate and rank in height of *Chamaecyparis obtusa*.

範囲と実際の林分データから計算された相関係数とを比較した。本研究では、以下の3つの変量の並び替え方法、

A：樹高・個体配置を固定、成長速度を並べ替え

B：成長速度・樹高を固定、個体配置を並べ替え

C：成長速度・個体配置を固定、樹高を並べ替え

について検証した。A, B, Cの並び替えで評価される帰無仮説はそれぞれ、

A：成長速度は樹高・個体配置に依存しない

B：成長速度は個体配置に依存しない

C：成長速度は樹高に依存しない

であり、本研究の目的である「個体サイズの直接影響を除外したBALと成長の関係評価」に相当するのはBである。いずれの変量の並び替えも1,000回試行し、相関係数の中央値および95%範囲を得た。計算は統計ソフトウェア R (3.1.1) を利用した。

計算に用いた林分のデータは、道木橋ヒノキ林（106年生, 380本ha<sup>-1</sup>, (3))における60m×60m, 136本分の個体配置・サイズおよび1年分の肥大成長量、および稻武ヒノキ林（21年生, 7,200本ha<sup>-1</sup> (7))における21年～25年生時の個体位置（12m×16m, 142本分）・サイズおよび5年分の成長量の値を用いた。なおこの林分の調査プロットは小さいため、BALの計算時には個体データをプロットの周囲8カ所（上下左右および各斜め方向）にダミーデータとして外挿したうえで行った。二つの実際の林分データに加えて、樹冠モジュール単位の光獲得競争をベースに駆動する林分成長シミュレータ CANDY (3)を用いて、林齢50年、個体密度1500本ha<sup>-1</sup>のスギ林分における個体の成長を51～70年生の20年分シミュレートし、そのうちの61～65年生にあたる5年分の成長データも利用した。

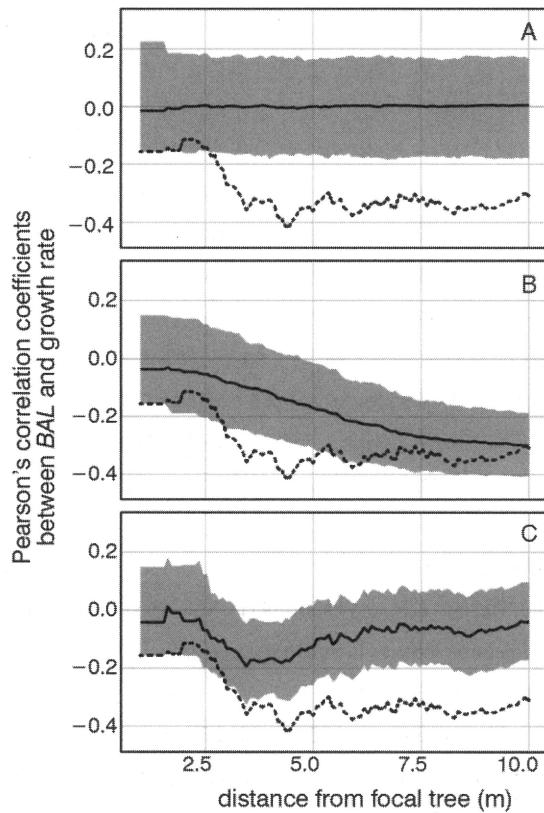


図-3. 道木橋ヒノキ林のデータから計算された BAL と成長速度との相関係数（破線）と、確率化テストで推定した相関係数（本文参照）の中央値（実線）および 95%範囲（灰色）

Fig. 3 Correlation coefficients between BAL and growth rate of focal tree in Dogibashi hinoki stand. Solid line with gray area means the median and 95% range of the correlation coefficients estimated by randomization tests in three randomization scenarios (A~C, see text). Broken line means the correlation coefficients calculated from the data.

### III 結果・考察

図-3に道木橋ヒノキ林のデータに基づく BAL と成長速度との相関係数を示す。破線で示された実データに基づく相関係数は、対象木からの距離（競合木探索範囲）の拡大と共に低下し、4 m を越えたあたりで下限となる。

並べ替え A により推定された相関係数の中央値はほぼ 0 であり、95%範囲の下限・上限はそれぞれ、-0.17, 0.17 で距離によらず一定であった。道木橋ヒノキ林の立木本数 136 本を想定するとき、5% の有意水準で帰無仮説（無相関）を棄却できるのは、相関係数が自由度-2 の  $t$  分布に従うと仮定した場合、 $\pm 0.14$  より大きい（小さい）ときである。並べ替え A による帰無仮説の 95%範囲は、これとおおよそ一致する。若干の差は、相関係数の計算に用いたデータの独立性仮定からの逸脱によるのかもしれない。

並べ替え Bにおいては、相関係数は対象木からの競合木探索範囲の拡張と共に低下した。これは、空間配置に

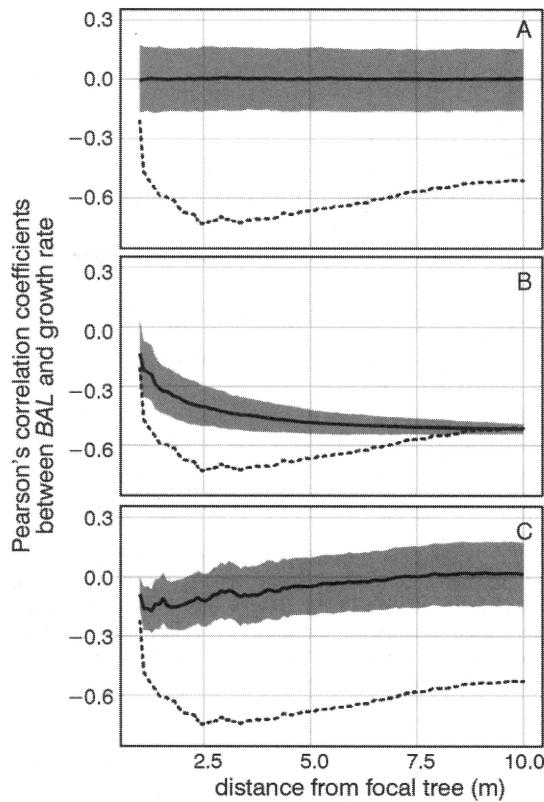


図-4. 稲武ヒノキ林のデータから計算された BAL と成長速度との相関係数（破線）と、確率化テストで推定した相関係数（本文参照）の中央値（実線）および 95%範囲（灰色）

Fig. 4 Correlation coefficients between BAL and growth rate of focal tree in Inabu hinoki stand. Solid line with gray area means the median and 95% range of the correlation coefficients estimated by randomization tests in three randomization scenarios (A~C, see text). Broken line means the correlation coefficients calculated from the data.

依存しない BAL と成長速度の間の負の相関が探索範囲の拡大と共に強くなることを示している。その上で実測値から計算された相関係数は、距離 3.0~6.1m の範囲で帰無仮説の 95%範囲を下回っていた。すなわち、この林分においては、対象木から 6.1m までの範囲内により大きな個体が存在する場合に、対象木の成長が抑制されていることを示唆しており、一方的競争による負の効果が検出できているといえる。

並べ替え Cにおいては、相関係数は距離とは明確な関係性はみられなかった。これは、C で評価される帰無仮説：「成長速度は樹高に依存しない」が個体の空間配置と無関係であることに対応しているのだろう。また実測値から計算された相関係数も、距離 3 m 以上からは帰無仮説の 95%範囲を下回っており、個体サイズと成長速度の負の相関関係は、ほぼ全ての距離範囲で成立することを示している。

道木橋ヒノキ林でみられた傾向は、より高密度かつ若

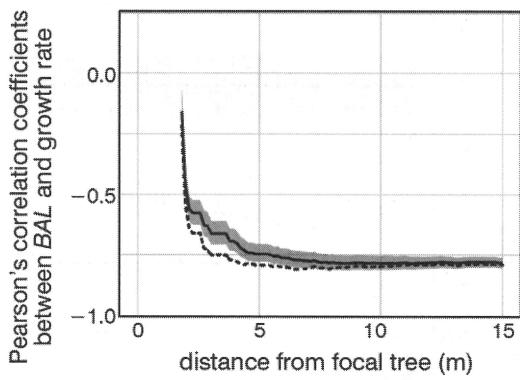


図-5. 林分成長シミュレータ CANDY による仮想スギ林分のデータから計算された BAL と成長速度との相関係数（破線）と、確率化テスト（並べ替え B）で推定した相関係数の中央値（実線）および 95%範囲（灰色）

Fig. 5 Correlation coefficients between BAL and growth rate of focal tree in a virtual forest simulated by CANDY. Solid line with gray area means the median and 95% range of the correlation coefficients estimated by randomization test in randomization scenario B. Broken line means the correlation coefficients calculated from the data.

齢の稻武ヒノキ林でもみられた（図-4）。稻武ヒノキ林では、1.0～8.3m の範囲において相関係数が並び替え B における相関係数の 95%範囲を下回っていた（図-4 B）。このことから、当該林分は超過密林分であるものの、一方的競争の影響は道木橋ヒノキ林と同程度の範囲の優位木から受けていることが示唆された。

CANDY でシミュレートした仮想林分においても、破線で示された BAL と成長速度の相関は、探索範囲の拡大と共に低下し、5m 付近でほぼ下限に達した（図-5）。また現実林分と同様に距離 2～7 m の範囲において、相関係数が並び替え B で得られた 95%範囲を下回っていた。BAL と成長速度の負の相関は、樹種・林齢が異なる他の多くの林分でも成り立つことが示されており（5），本研究の結果もこれらの結果と一致する。このことから、この指標が一方的競争（光獲得競争）を評価するうえで普遍的なものとして利用可能であることを示唆される。ただし他の林分においても、BAL と成長との負の相関が個体サイズの直接影響を越えて存在するか検証する必要があるだろう。

#### IV まとめ

個体配置に依存しない BAL と成長速度の関係（並べ替え B による帰無仮説）も、対象個体からの距離の伸長につれて相関係数が低下していた。このため、BAL を指標として一方的競争の影響を正しく評価するためには、本研究で示したような変数並べ替えによる確率化テストの適応が必要となるだろう。一方で双方向的競争につい

ては、BA を積算する際に個体サイズの優劣による選択を受けないため、競争の影響評価のための帰無仮説は、通常の相関係数の検定のものとほぼ同等であるとみなせる。ただし、データ間の独立性は保証されていないため、パラメトリックな検定ではなく並べ替え A による確率化テスト（帰無仮説：成長速度は個体位置・サイズに依存しない）で評価することが望ましいだろう。この一方的競争と双方向的競争で基準となる帰無仮説が異なるという点は、BAL（一方的競争）／BA（双方向的競争）と成長速度との相関係数の大小比較では両者の影響力の強弱を評価できない可能性を示唆している。今後、相関係数の単純比較に替わる評価方法の検討が必要になるだろう。

#### 引用文献

- (1) BIGING G.S. and DOBBERTIN M. (1995) Evaluation of competition indexes in individual tree growth-models, Forest Sci **41** : 360-377
- (2) HUANG J.G., et al. (2013) Modelling growth -competition relationships in trembling aspen and white spruce mixed boreal forests of western canada, Plos One **8** : 14pp
- (3) 梶本卓也ら (2014) H23~25 交付金プロ「人工林施業の長伐期化に対応した将来木選定の指針策定」，森林総合研究所, 16pp
- (4) MASAKI T., et al. (2006) Long-term growth analyses of japanese cedar trees in a plantation: Neighborhood competition and persistence of initial growth deviations, J For Res **11** : 217-225
- (5) 正木隆・櫃間岳・八木橋勉・杉田久志・長池卓男・斎藤哲・壁谷大介・梶本卓也・太田敬之・梶谷宜弘 (2014) 樹木の成長からみた高齢級林分の個体配置, 第 125 回日本森林学会大会 **125** : 863
- (6) MITCHELL-OLDS T. (1987) Analysis of local variation in plant size, Ecology **68** : 82-87
- (7) SUMIDA A., MIYURA T. and TORII H. (2013) Relationships of tree height and diameter at breast height revisited: Analyses of stem growth using 20-year data of an even-aged *chamaecyparis obtusa* stand, Tree Physiol **33** : 106-118
- (8) 橋敏明 (1997) 確率化テストの方法-誤用しない統計的検定, 日本国文化科学社, 東京: 243pp
- (9) WIMBERLY M.C., BARE B.B. (1996) Distance dependent and distance-independent models of douglas-fir and western hemlock basal area growth following silvicultural treatment, Forest Ecol Manag **89** : 1-11