下鴨神社紵の森におけるイロハモミジ (*Acer palmatum* Thunb.) の断面積成長への対象個体サイズおよび周辺競争個体密度の影響

田端敬三^{*1)}・橋本啓史²⁾・森本幸裕^{3,4)}

1) 近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, Kindai University

2) 名城大学農学部 Faculty of Agriculture, Meijo University

3) 京都大学名誉教授 Professor Emeritus of Kyoto University

4) 公益財団法人 京都市都市緑化協会 Kyoto City Greenery Association

摘要: 下鴨神社紵の森で4回実施された胸高直径10 cm以上の樹木を対象とした毎木調査結果から、3期間(1991~2002年, 2002~2010年, 2010~2018年)でのイロハモミジ各対象木の断面積成長量を測定し、さらに対象木サイズ、周辺の個体密度との関係を検討した。その結果、断面積成長速度を目的変数とする一般化線形混合モデルでは、1991~2002年は、上層木の胸高断面積の総和、2002~2010年は上層木との、2010~2018年では全競争木との胸高断面積の相対比の総和が説明変数として選択され、偏回帰係数はいずれも負の値を示した。胸高断面積階級毎および競争指数階級毎での断面積相対成長速度を3期間で比較した結果、1991~2002年より2010~2018年において断面積相対成長速度が低下する傾向が見られた。

キーワード: 都市林, 断面積成長, イロハモミジ, 競争指数

TABATA, Keizo, HASHIMOTO, Hiroshi and MORIMOTO, Yukihiro: **Influence of the densities of neighboring individuals and size of object trees on the basal area growth of *Acer palmatum* Thunb. in Tadasu-No-Mori Forest, Shimogamo-Jinja shrine**

Abstract: Basal area growth values of *Acer palmatum* were obtained during three periods (1991–2002, 2002–2010, and 2010–2018) from Tadasu-No-Mori forest, from measurements of trees of ≥ 10 cm. The relationship between the basal area growth of *A. palmatum*, object tree size, and density of neighboring trees was examined. In prediction models using basal area growth rate as the objective variable, the sum of basal areas of neighboring trees (1991–2002) and the sum of relative ratio of basal area of neighboring trees and the object tree (2002–2010, 2010–2018) were selected as explanatory variables. Under the same conditions, for object trees size and density of neighboring trees, the basal area relative growth rate of *A. palmatum* tended to be lower in 2010–2018 than in 1991–2002.

Key words: urban forest, basal area growth, *Acer palmatum* Thunb., competition index

1. はじめに

市街地内に位置する森林は、大気汚染物質の吸収、防災、生態系の形成やヒートアイランド現象の緩和など、都市の環境の改善に大きく寄与する存在である⁷⁾。こうした都市の森林の重要な機能のひとつが、景観の形成である。コンクリートに覆われた無機質な風景を美しく彩り、向上させる効果を都市の森林は有している。人工構造物とは異なり、森林は四季折々の変化が見られ、特に秋季には落葉樹が黄葉や紅葉し、その代表的な樹種が、ムクロジ科カエデ属の落葉高木のイロハモミジ *Acer palmatum* Thunb.である。

都市空間において、イロハモミジの良好な生育を図ることは、住民が遠隔地を訪れずとも、身近な生活圏内で紅葉景観を鑑賞できることにつながる。しかし、都市内でのイロハモミジは通常、公園や庭園内で、あるいは街路樹として育成さ

れている。公園や庭園、街路空間では、樹木の成長は制限され、樹形やサイズの維持、通行支障の抑制などを目的として、幹や大枝の切断が行われる^{2,3)}。しかしこのような過度の管理は幹の腐朽を誘発し、結果的に樹勢を衰退させる²⁾。イロハモミジは、幹は直立し、樹高は15 m程度まで成長する樹種である¹⁰⁾。美しく紅葉するイロハモミジの本来の自然樹形を呈した状態での育成は、都市内のランドマーク形成につながると考えられる。しかし、そのためには都市空間での、人為的な管理強度の非常に低い、高い自然性を有した森林内におけるイロハモミジの生態的特性の把握が必要となるが、東京の自然教育園内での本種の個体数の増加に関する報告¹³⁾を除き、研究例は皆無である。そこで、本研究は、市街地内で大面積、且つ、自然性の高い森林が維持されている稀有な空間である京都下鴨神社の社叢、紵の森において、長期間継続して行われている生態調査の結果から、都市の森林でのイロ

* 連絡先著者 (Corresponding author) : 〒631-8505 奈良県奈良市中町 3327-204 E-mail : keizo_tabata@ybb.ne.jp

ハモミジの成長への対象個体サイズと周辺競争個体密度の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 調査地概要

本研究の調査対象地、糺の森は、京都で最も古い神社のひとつである賀茂御祖神社（下鴨神社）の境内林で、京都市の北東部（北緯 35° 2', 東経 135° 45'）に位置している。面積は 12.4 ha である。1983 年に国の史跡に指定され、また 1994 年にはユネスコの世界遺産に登録されている¹⁵⁾。

2010 年に行われた胸高直径 10 cm 以上の全樹木を対象とする糺の森全域での毎木調査では、全樹種での胸高断面積合計は 43.0 m² / ha であった¹⁹⁾。樹種別ではクスノキ *Cinnamomum camphora* (L.) J.Presl の値が 9.8 m² / ha で最も大きく、優占度は 23%となっていた。続いてムクノキ *Aphananthe aspera* (Thunb.) Planch., エノキ *Celtis sinensis* Pers.が高い優占度を示していた¹⁹⁾。全樹種での立木密度は 400.3 本 / ha であった。全樹種の樹高の平均値（±標準偏差）は、1991 年が 13.3 ± 6.1 m, 2002 年が 14.5 ± 6.4 m, 2010 年は 15.1 ± 7.0 m, 2018 年では 14.6 ± 7.2 m となっていた。

京都市の気象条件は、年間での平均気温は 15.9°C である。また月別の平均気温は、最寒月の 1 月が 4.6°C, 最暖月の 8 月が 28.2°C である⁴⁾。暖かさの指数は 130.7°C 月、寒さの指数は -0.4°C 月で、照葉樹林帯域に該当する。年間での平均降水量は 1491.3 mm である（1981 年～2010 年の平年値）⁴⁾。京都市内での過去の大規模な自然災害として、1934 年に室戸台風が、1935 年には大水害が発生した。その影響により、当時、糺の森内では多数の樹木が倒伏した。1939 年に確認された幹周囲長 1 m 以上の樹木は 97 本であった¹⁵⁾。

3. 調査方法

3.1 毎木調査

地上高 1.3 m での胸高直径 10 cm 以上の樹木を対象として調査を実施した。それぞれの樹木について個体識別を行い、樹種を記録し、樹高、胸高周囲長、生育位置を計測した。2002 年調査のみ、末社の出雲井於神社内が未測定であるのを除き、1991 年、2002 年、2010 年、2018 年の 4 回、いずれも同内容での調査を行った^{18,19)}。各実施時期は、1991 年が 8 月、2002 年は 7 月、2010 年は 11 月から翌年 3 月にかけて、2018 年は 11 月から翌年 4 月にかけてである^{18,19)}。

4. 解析方法

4.1 解析対象木の選定

1991～2002 年、2002～2010 年、2010～2018 年の各期間内で生存が確認された胸高直径 10 cm 以上のイロハモミジを解析対象木とした（表-1）。なお、解析対象木の中には、植栽されたものも一部含まれている可能性があるが、植栽に関する明確な記録が存在しないため、本研究では自然侵入木と

植栽木とを区別せず、一括して扱った。

4.2 胸高断面積成長量の算出

各対象木について 1991 年、2002 年、2010 年、2018 年の胸高周囲長（GBH）の測定結果から、幹の形状を真円と仮定し、式 1 により胸高断面積（BA）の値を計算した（式 1）。

$$BA = \pi (GBH / \pi / 2)^2 \quad (1)$$

各調査期間での胸高断面積の期末値 BA_{end of period} および、その自然対数値 Ln(BA_{end of period}) から期首値 BA_{initial}, Ln(BA_{initial}) を各々差し引き、さらに、この値を調査間隔年数で除算することにより、胸高断面積成長速度（BA_{gr}）および、胸高断面積相対成長速度（BA_{rgr}）を求めた（式 2, 3）¹⁹⁾。

$$BA_{gr} (cm^2 / 年) = (BA_{end of period} - BA_{initial}) / \text{調査間隔年数} \quad (2)$$

$$BA_{rgr} (cm^2 / cm^2 / 年) = [Ln(BA_{end of period}) - Ln(BA_{initial})] / \text{調査間隔年数} \quad (3)$$

調査間隔年数は 1991～2002 年が 11 年、2002～2010 年、2010～2018 年がそれぞれ 8 年である。

4.3 胸高断面積成長量への影響要因

4.3.1 周辺木密度

森林内では、光や土壌中の養分および水分などの資源をめぐって、隣接する樹木どうしが競争関係にあり¹¹⁾、周辺木の密度がより高い条件にあるほど、より樹木の肥大成長は抑制される¹¹⁾。そこで、周辺木の密度条件の指標である競争指数（Competition index, CI）^{1,6,16)}を用いて、イロハモミジの成長との関連性を検討した。

各イロハモミジ対象木を中央に据えた、半径 5 m から最大 20 m までの同心円を設定し、各範囲内に位置する胸高直径 10 cm 以上の周辺木を「全競争木」と定義した²⁰⁾。さらに全競争木の中で樹冠頂部が、イロハモミジ対象木の樹冠頂部に上に位置する樹木を「上層木」とした²⁰⁾。

イロハモミジ対象木および周辺木それぞれの胸高断面積の期首値、加えて、イロハモミジ対象木と周辺木間での水平距離の値から、次の 3 つの競争指数を求めた（式 4～式 6）。

$$CI_1 = \sum BA_i \quad (4)^{16)}$$

$$CI_2 = \sum (BA_i / BA) \quad (5)^{6)}$$

$$CI_3 = \sum (BA_i / BA / dist) \quad (6)^{1)}$$

表-1 イロハモミジ対象木の胸高断面積と樹高

Table 1 Basal area and height of object trees of *Acer palmatum*

調査年	本数	胸高断面積 (cm ²)		樹高 (m)	
		平均	S.D.	平均	S.D.
1991	155	256.9	137.8 a	8.2	2.8 a
2002	159	300.3	170.0 a	9.6	3.0 b
2010	171	305.2	183.0 a	9.7	2.5 b
2018	171*	329.1	189.9 b	10.2	2.7 b

*: 2010～2018年にサイズ計測を行った本数。
同一サイズ項目内の各年の間での異なるアルファベットは、有意差を示す。(p < 0.05)

[BA_i: 周辺木の胸高断面積の期首値 (m²)

BA: 対象木の胸高断面積の期首値 (m²)

dist: 対象木と周辺木との間の水平距離 (m)]

4.3.2 対象木サイズ

周辺木の密度条件と共に、対象樹木自体のサイズが成長への影響要因であることが報告されている²¹⁾。そこで、イロハモミジの対象木のサイズとして、胸高断面積の期首値を採用し、胸高断面積成長との関係を考査した。

4.4 統計解析

4.4.1 統計モデル

周辺木の密度およびイロハモミジ対象木のサイズが胸高断面積成長に対して与える影響を、目的変数の分布を正規分布、ランダム効果を対象個体とする一般化線形混合モデル⁵⁾を用いて検討した。一般化線形混合モデルの目的変数は、断面積成長速度とした。説明変数は、対象木のサイズおよび競争指数 CI の 2 項目とした。説明変数 CI に関しては、CI₁, CI₂, CI₃ の 3 種類それぞれに対し、半径 5 m から半径 20 m までの 1 m ごとの 16 通りの範囲設定、さらに「全競争木」あるいは「上層木」の 2 通り、以上の 96 通りの組み合わせを検討した。さらに説明変数の選択方法として「対象木のサイズのみ」、「競争指数 CI のみ」、「対象木のサイズと競争指数 CI の両方」の 3 つの場合の総計 193 の組み合わせについてモデルを構築し、各調査期間について、赤池情報量規準 (AIC) が最小となったものを、イロハモミジの胸高断面積成長速度の予測精度が最も高いモデルとした。加えて、この各調査期間についての予測精度の最も高いモデルを基に、各イロハモミジ対象木の胸高断面積成長速度の予測値を算出した。予測の計算には、ランダム効果の平均を 0、標準偏差を最尤推定値とする正規乱数を発生させ、1,000 回のモンテカルロ・シミュレーションを繰り返した。1,000 回の試行での平均を各個体の胸高断面積成長速度予測値とし、実測値との比較を行った。

4.4.2 胸高断面積相対成長速度の調査期間ごとでの比較

イロハモミジ対象木のサイズおよび周辺木の密度が同程度である条件下で、調査期間別でのイロハモミジの胸高断面積相対成長速度を比較した。

各調査期間でのイロハモミジ対象木、1991~2002 年が 155 本、2002~2010 年は 159 本、2010~2018 年が 171 本 (表-1) の合計 485 本全体での、胸高断面積の値と競争指数の値について、3 分位法によって 3 階級 (階級 I: 第 1 三分位数未満, 階級 II: 第 1 三分位数以上で第 2 三分位数未満, 階級 III: 第 2 三分位数以上) に区分した。各調査期間において、各胸高断面積階級別、および、競争指数階級別に、条件が該当するイロハモミジ対象木の胸高断面積相対成長速度を合計した。さらに、この合計値を各階級に該当する対象木本数で除算することによって、各調査期間における各胸高断面積階級別、各競争指数階級別でのイロハモミジの胸高断面積相対成長速度の平均値を算出した。加えて、Steel-Dwass 検定を用

いて、同一の胸高断面積階級および同一の競争指数階級で、3 つの調査期間の間での有意差を多重比較した。

以上の統計解析には、統計ソフト R version 3.6.3¹⁴⁾ を用いた。

5. 結果

5.1 胸高断面積成長速度への影響要因

イロハモミジ対象木のサイズについて、胸高断面積は 2010 年までの各調査年と 2018 年との間でそれぞれ平均値に有意差が見られた ($p < 0.05$, 表-1)。一方、樹高は 1991 年と 2002 年以降の各調査年との間でそれぞれ有意な差が見られた ($p < 0.05$, 表-1)。

胸高断面積成長速度を目的変数とした一般化線形混合モデルで、1991~2002 年については、周辺木の胸高断面積の総和 (CI₁)、2002~2010 年、2010~2018 年では周辺木との胸高断面積の相対比の総和 (CI₂) が各々説明変数として選択された。偏回帰係数はいずれも負の値を示した (表-2)。1991~2002 年では対象木から半径 19 m 範囲内に位置する上層木、2002~2010 年は半径 14 m 範囲内の上層木、一方、2010~2018 年については、半径 15 m 範囲内の全競争木が、それぞれ、最も強く断面積成長速度に影響していた (表-2)。

各調査期間での予測精度が最も高いモデルから、各イロハモミジ対象木の胸高断面積成長速度の予測値を計算し、実測値と比較した結果を図-1 に示した。いずれの調査期間においても、調査地内を南北方向に細長く延びる馬場や参道沿いに位置する対象木の多くについて、実測値が予測値未満となる傾向にあった。しかし、その傾向は、調査期間 2010~2018 年では、さらに顕著となると同時に、樹林内部に生育する対

表-2 イロハモミジの胸高断面積成長速度の予測精度が上位の一般化線形混合モデルにおいて選択された説明変数

Table 2 Explanatory variables selected in the generalized linear mixed models with higher prediction accuracy for the basal area growth rate of *Acer palmatum*

説明変数	偏回帰係数	AIC	ΔAIC
1991~2002年 (N = 155)			
1 半径19m範囲内の上層木CI ₁	-1.918***	1019.7	0.0
2 半径19m範囲内の全競争木CI ₁	-1.833**	1020.8	1.1
3 半径20m範囲内の上層木CI ₁	-1.678**	1021.0	1.3
2002~2010年 (N = 159)			
1 半径14m範囲内の上層木CI ₂	-0.020*	1027.4	0.0
2 半径14m範囲内の全競争木CI ₂	-0.019*	1027.5	0.1
3 半径13m範囲内の上層木CI ₂	-0.021*	1027.9	0.5
2010~2018年 (N = 171)			
1 半径15m範囲内の全競争木CI ₂	-0.013***	876.4	0.0
2 半径15m範囲内の上層木CI ₂	-0.013***	877.0	0.6
3 半径17m範囲内の全競争木CI ₂	-0.011***	877.0	0.7

CI₁: $\sum BA_i$, CI₂: $\sum (BA_i/BA)$, CI₃: $\sum (BA_i/BA/dist)$

BA_i: 周辺木の胸高断面積 (m²), BA: 対象木の胸高断面積 (m²)

dist: 周辺木と対象木との間の水平距離 (m)

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

図-1 胸高断面積成長速度の各期間での精度が最も高い一般化線形混合モデルによる予測値と実測値との比較

Fig. 1 Comparison the measured value of basal area growth rate of the object tree of *Acer palmatum* with the value estimated by the best generalized linear mixed model for each period

象木についても、予測値未満の実測値を示す対象木が増加した (図-1)。

5.2 胸高断面積相対成長速度の調査期間別での比較

胸高断面積相対成長速度は、いずれの胸高断面積の階級においても、調査期間の間で平均値に有意差がみられた (表-3)。胸高断面積が 183.4 cm^2 未満、および、 317.0 cm^2 以上の階級では、1991～2002 年と 2010～2018 年の間で有意差が見られた ($p < 0.05$)。胸高断面積が 183.4 cm^2 以上 317.0 cm^2 未満の階級では、1991～2002 年と 2002～2010 年との間、1991～2002 年と 2010～2018 年との間、各々の間で有意差が見られた ($p < 0.05$)。胸高断面積の全階級で、3 調査期間の中で、1991～2002 年の平均値が最も高い値を示す傾向があった (表-3)。また同一の調査期間内では、いずれも、胸高断面積が 183.4 cm^2 未満の階級での胸高断面積相対成長速度の平均値が最も大きな値を示していた (表-3)。

各調査期間でのイロハモミジの胸高断面積成長速度の予測精度が最も高いモデルにおいて選択された競争指数、半径 19 m 範囲内に位置する上層木による CI_1 、半径 14 m 範囲内に位置する上層木による CI_2 、半径 15 m 範囲内の全競争木による CI_2 、以上 3 つの競争指数の階級別での、断面積相対成

長速度の平均値を表-4 に示した。3 つの競争指数各々の 3 つの階級、計 9 つの階級のうち、半径 19 m 範囲内の上層木による CI_1 の 4.11 以上の階級および半径 15 m 範囲内の全競争木による CI_2 の 76.65 未満の階級を除く、7 つの階級で、1991～2002 年が胸高断面積相対成長速度の平均が最も高い値を示す傾向があった (表-4)。また同一の調査期間内での比較では、半径 19 m 範囲内に位置する上層木による CI_1 については、最小の 3.24 未満の階級で胸高断面積相対成長速度の平均が最も高い値を示す傾向が見られた。一方、半径 14 m 範囲内に位置する上層木による CI_2 、半径 15 m 範囲内の全競争木による CI_2 においては、 CI が最大の階級での胸高断面積相対成長速度の平均値が最も高い値となる傾向を示していた (表-4)。

競争指数各々の 3 つの階級に、さらに胸高断面積の 3 つの階級を併せて、同一の競争指数階級、且つ、同一の胸高断面積階級内での調査期間の間での胸高断面積相対成長速度の差を検討した (表-4)。その結果、半径 19 m 範囲内に位置する上層木による CI_1 では、「 CI_1 が 3.24 以上 4.11 未満、且つ、胸高断面積が 183.4 cm^2 以上 317.0 cm^2 未満」と「 CI_1 が 3.24 未満、且つ、胸高断面積が 317.0 cm^2 以上」の階級において、また、半径 14 m 範囲内に位置する上層木による CI_2 については、「 CI_2 が 61.64 未満、且つ、胸高断面積が 317.0 cm^2 以上」をはじめとする 4 つの階級で、また、半径 15 m 範囲内に位置する全競争木による CI_2 については、「 CI_2 が 76.65 未満、且つ、胸高断面積が 317.0 cm^2 以上」を含めた 3 つの階級で、調査期間の間でイロハモミジの胸高断面積相対成長速度に有意差が見られた。いずれの競争指数および、胸高断面積の階級についても、調査期間 1991～2002 年での値が最も高く、対して、2010～2018 年の平均値が最も低くなっていった (表-4)。

各イロハモミジ対象木から半径 14～19 m に位置する周辺木による競争指数の各調査期間での平均値を表-5 に示した。半径 14 m 範囲内に位置する上層木による CI_2 と半径 15 m 範囲内の全競争木による CI_2 については、調査期間の間で有意差は無かった。これに対して、半径 19 m 範囲内に位置する上層木による CI_1 では、1991～2002 年と 2010～2018 年

表-3 イロハモミジの胸高断面積階級別での断面積相対成長速度
Table 3 Basal area relative growth rate of *Acer palmatum* in each basal area class

調査期間	胸高断面積階級 (cm^2)								
	< 183.4			183.4 ≤ < 317.0			317.0 ≤		
	本数	平均	S.D.	本数	平均	S.D.	本数	平均	S.D.
1991-2002年	57	0.023	0.027 a	59	0.016	0.021 a	39	0.013	0.021 a
2002-2010年	45	0.023	0.025 ab	56	0.013	0.014 b	58	0.009	0.022 ab
2010-2018年	59	0.014	0.017 b	47	0.009	0.010 b	65	0.008	0.008 b

アルファベットは同一胸高断面積階級内の、各期間の間での多重比較結果を示す
異なるアルファベットは期間の間で有意差あり ($p < 0.05$)

表-4 イロハモミジの胸高断面積階級別および競争指数階級別での断面積相対成長速度

Table 4 Basal area relative growth rate of *Acer palmatum* in each basal area class and in each competition index class

		胸高断面積階級 (cm ²)													
		< 183.4			183.4 ≤ 317.0			317.0 ≤			計				
		胸高断面積 相対成長速度 (cm ² /cm ² /年)			胸高断面積 相対成長速度 (cm ² /cm ² /年)			胸高断面積 相対成長速度 (cm ² /cm ² /年)			胸高断面積 相対成長速度 (cm ² /cm ² /年)				
競争指数	競争指数階級	調査期間	本数	平均	S.D.	本数	平均	S.D.	本数	平均	S.D.	本数	平均	S.D.	
半径19m範囲 内の上層木 Σ BA _i (CI ₁)	< 3.24	1991-2002年	19	0.037	0.033	22	0.013	0.027	19	0.016	0.024 a	60	0.021	0.030 a	
		2002-2010年	15	0.024	0.025	16	0.015	0.021	24	0.010	0.030 a	55	0.015	0.026 ab	
		2010-2018年	19	0.018	0.016	8	0.008	0.008	18	0.008	0.009 b	45	0.012	0.013 b	
	3.24 ≤ < 4.11	1991-2002年	14	0.016	0.028	27	0.019	0.010 a	13	0.017	0.010	54	0.018	0.016 a	
		2002-2010年	10	0.027	0.039	26	0.011	0.011 b	19	0.007	0.016	55	0.012	0.021 b	
		2010-2018年	14	0.018	0.020	15	0.009	0.009 b	24	0.010	0.008	53	0.012	0.012 b	
	4.11 ≤	1991-2002年	24	0.017	0.015	10	0.015	0.026	7	-0.001	0.022	41	0.013	0.020 a	
		2002-2010年	20	0.019	0.015	14	0.014	0.010	15	0.009	0.008	49	0.014	0.012 a	
		2010-2018年	26	0.010	0.015	24	0.009	0.011	23	0.007	0.007	73	0.009	0.012 b	
	< 61.64	1991-2002年	0	-	-	14	0.009	0.032	33	0.015	0.016 a	47	0.014	0.022 a	
		2002-2010年	1	-	-	12	0.021	0.017	44	0.009	0.024 ab	57	0.012	0.023 a	
		2010-2018年	1	-	-	11	0.010	0.009	44	0.009	0.008 b	56	0.009	0.008 b	
	61.64 ≤ < 106.01	1991-2002年	10	0.018	0.024	32	0.017	0.016 a	6	0.001	0.038	48	0.015	0.021 a	
		2002-2010年	9	0.034	0.041	32	0.011	0.014 ab	13	0.006	0.014	54	0.014	0.022 ab	
		2010-2018年	14	0.021	0.016	25	0.010	0.011 b	21	0.008	0.006	60	0.012	0.012 b	
半径14m範囲 内の上層木 Σ (BA _i /BA) (CI ₂)	106.01 ≤	1991-2002年	47	0.024	0.027 a	13	0.021	0.014 a	0	-	-	60	0.024	0.025 a	
		2002-2010年	35	0.019	0.018 ab	12	0.009	0.008 b	1	-	-	48	0.016	0.016 ab	
		2010-2018年	44	0.012	0.017 b	11	0.005	0.005 b	0	-	-	55	0.011	0.015 b	
	< 76.65	1991-2002年	0	-	-	16	0.001	0.031	34	0.013	0.022 a	50	0.009	0.026 a	
		2002-2010年	1	-	-	9	0.020	0.023	47	0.008	0.024 ab	57	0.011	0.025 a	
		2010-2018年	1	-	-	7	0.012	0.011	45	0.008	0.009 b	53	0.009	0.009 b	
	76.65 ≤ < 129.33	1991-2002年	8	0.034	0.045	36	0.021	0.010 a	5	0.014	0.012	49	0.022	0.020 a	
		2002-2010年	8	0.014	0.010	34	0.012	0.013 b	11	0.012	0.008	53	0.012	0.011 b	
		2010-2018年	12	0.020	0.017	28	0.010	0.010 b	20	0.009	0.006	60	0.012	0.011 b	
	129.33 ≤	1991-2002年	49	0.021	0.023 a	7	0.023	0.019	0	-	-	56	0.022	0.022 a	
		2002-2010年	36	0.023	0.026 ab	13	0.009	0.007	0	-	-	49	0.020	0.024 ab	
		2010-2018年	46	0.013	0.017 b	12	0.003	0.006	0	-	-	58	0.011	0.016 b	

BA_i: 周辺木の胸高断面積 (m²), BA: 対象木の胸高断面積 (m²)アルファベットは同一競争指数階級、同一胸高断面積階級内での、各期間の間での多重比較結果を示す。異なるアルファベットは期間の間で有意差あり ($p < 0.05$)。アルファベットの無表示は期間の間で有意差なし

の間で有意な差が見られ ($p < 0.05$)、2010~2018 年においてより高い値が見られた (表-5)。

6. 考察

今回、イロハモミジの胸高断面積成長速度には、周辺の競争個体の密度の影響が強く見られ、負の相関関係を示していた (表-2)。また、イロハモミジ対象木から半径 14~19 m の広い範囲内に位置する周辺木の密度が影響していた (表-2)。周辺木の密度が対象木の成長へ与える影響については主にスギ、ヒノキの人工林において調査がなされており、45~83 年生のスギ林で半径 8 m⁸⁾、65~75 年生のヒノキ林で半径 9 m⁹⁾、48~50 年生のヒノキ林で 10~11 m⁹⁾との報告がある。幅の狭い樹冠を持つ針葉樹であるスギ、ヒノキ人工林と比較し、イロハモミジが利用する光の違いが、より広範囲に位置する周辺木の密度の影響を大きくした可能性が考えられる。

1991~2002 年では、イロハモミジ対象木の樹冠頂部以上に位置する樹木である上層木からの影響がより強く見られたのに対し、2010~2018 年ではイロハモミジ対象木より下層に位置する樹木も含めた全競争木の密度が胸高断面積成長速度に強く影響していた (表-2)。サイズの小さな樹木は大きな樹木に被圧され成長が制限されるが、サイズの大きな樹木は小さな樹木からの影響を受けない、光を巡っての 1 方向的競争¹²⁾よりも、樹冠が同一の階層に属する樹木間では、サイズの大きな樹木と小さな樹木が互いに影響を及ぼしあう、土壌

中の養水分を巡っての双方向的競争¹²⁾が優勢になることが指摘されている¹⁷⁾。全樹種について及びイロハモミジ対象木の樹高の平均値は、それぞれ、1991 年が 13.3 m と 8.2 m、2002 年が 14.5 m と 9.6 m、2010 年は 15.1 m と 9.7 m、2018 年では 14.6 m と 10.2 m となっており、1991 年から 2018 年にかけて、全樹種での平均値は 1.3 m 増加していたのに対し、イロハモミジ対象木では、2.0 m の増加が見られた。加えて、1991 年と比較して、2018 年では、イロハモミジ対象木の樹高は有意に大きく、より林内の上層に位置する傾向が見られた (表-1)。樹高の成長に伴い、双方向的な競争の影響が強く

表-5 イロハモミジの対象木から半径 14~19 m 範囲内に位置する周辺木による競争指数の平均値

Table 5 Average value of competition index of neighborhood trees located within a radius of 14 to 19 m from the object tree of *Acer palmatum*

		半径19m範囲内の 上層木CI ₁		半径14m範囲内の の上層木CI ₂		半径15m範囲内の の全競争木CI ₂	
調査年	本数	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
1991	155	3.50	0.98 a	97.8	61.9	119.6	73.4
2002	159	3.63	0.97 ab	88.2	55.7	109.3	66.6
2010	171	3.84	0.99 b	94.6	59.8	115.9	70.9

CI₁: Σ BA_i, CI₂: Σ (BA_i/BA)BA_i: 周辺木の胸高断面積 (m²), BA: 対象木の胸高断面積 (m²)アルファベットは同一競争指数内での、各調査年の間での多重比較結果を示す。異なるアルファベットは調査年の間では有意差あり ($p < 0.05$)

アルファベットの無表示は期間の間で有意差なし

なった可能性がある。また、1991～2002 年と他調査期間との間で、周辺木の胸高断面積値は、有意差が見られた (表-5)、このことが、1991～2002 年は、周辺木の胸高断面積の総和 (CI₁) が、他の期間では相対比の総和 (CI₂) が成長に影響した一要因の可能性が考えられる。

今回、同程度の対象木サイズ、同程度の周辺木の密度の条件で、1991～2002 年、2002～2010 年、2010～2018 年の 3 調査期間での胸高断面積相対成長速度を比較した結果、より後の期間におけるほど、断面積相対成長速度が低下する傾向が見られた (表-4)。イロハモミジの成長不良木の多くは、人の立ち入りが多く、参道周辺などに集中し (図-1)、調査期間の後期になるほど、参道周辺のみならず樹林内部に生育する対象木においても、断面積相対成長速度が低下する対象木が増加した (図-1)。都市の樹木の生育阻害の大きな要因として踏圧による土壌の固結が指摘されている²²⁾。イロハモミジの成長不良木の多くが参道周辺などに多いこと、調査期間の後期ほど、断面積相対成長速度が低下する対象木が増加したことは、来訪者増加に伴う土壌の踏圧の増大が生じた可能性や対象木の加齢による樹勢の低下が関係している可能性が推察される。

以上、本研究の結果から、都市域に位置し、高い自然性を有する森林内でのイロハモミジの断面積成長には、半径 14～19 m の広い範囲内の周辺木の密度が影響することが明らかとなった。また、イロハモミジの樹高の成長に伴い、断面積成長への、樹冠が低い位置に在る周辺木からの影響がより顕著となる可能性が示された。イロハモミジに対してはこうした生態的特性を踏まえた適切な育成管理が有効であると思われる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、賀茂御祖神社から、境内での調査の許可を頂いた。また、本研究の一部は、公益財団法人阪本奨学会の助成を受けた。以上の皆様に厚く御礼申し上げる。

引用文献

- 1) * Hegyi, F. (1974) A simulation model for managing jackpine stands. In: Fries J (eds) Proceedings of IUFRO meeting S4.01.04 on Growth models for tree and stand simulation. pp 74-90. Royal College of Forestry.
- 2) 堀 大才 (2015) 絵でわかる樹木の育て方. 講談社, 232 pp.
- 3) 亀山 章編 (2000) 街路樹の緑化工. ソフトサイエンス社, 214 pp.
- 4) 気象庁. “過去の気象データ検索”. 気象庁ホームページ. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照: 2020 年 1 月 25 日).
- 5) 久保拓弥・粕谷英一 (2006) 「個体差」の統計モデリング. 日本生態学会誌, 56 (2) : 181-190.
- 6) Lorimer, C. G. (1983) Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. Forest Ecology and Management, 6:

343-360.

- 7) 真鍋 徹・石井弘明・伊東啓太郎 (2007) 都市緑地としての社寺林の機能評価に向けて. 景観生態学, 12 (1) : 1-7.
- 8) Masaki, T., Mori, S., Kajimoto, T., Hitsuma, G., Sawata, S., Mori, M., Osumi, K., Sakurai, S. and Seki, T. (2006) Long-term growth analyses of Japanese cedar trees in a plantation: neighborhood competition and persistence of initial growth deviations. Journal of Forest Research, 11 : 217-225.
- 9) 宮本和樹・酒井 敦・大谷達也・松岡真如・山崎敏彦 (2015) 四国地方の高齢級スギ・ヒノキ人工林における個体間競争が植栽木の成長に及ぼす影響. 日本森林学会誌, 97 (4) : 171-181.
- 10) 茂木 透・勝山輝男・太田和夫・城川四郎・高橋秀男・吉山 寛・石井英美・崎尾 均・中川重年 (2000) 樹に咲く花 (2). 山と溪谷社, 719 pp.
- 11) 名波 哲 (2019) 2.2 森林生態系の動態. 石井弘明編, 森林生態学, 朝倉書店, pp. 19-30.
- 12) 西村尚之・原登志彦 (2011) 11. 樹木の個体間競争と種の共存. 日本生態学会編, 森林生態学, 共立出版, pp. 173-188.
- 13) 大山亮平・福嶋 司 (2001) 自然教育園におけるイロハモミジの増加とその要因に関する研究. 自然教育園報告, 33: 113-125.
- 14) R Development Core Team (2020) R: a language and environment for statistical computing : R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- 15) 四手井綱英編 (1993) 下鴨神社紵の森. ナカニシヤ出版, 296 pp.
- 16) Steneker, G. A. and Jarvis, J. M. (1963) A preliminary study to assess competition in a white spruce-trembling aspen stand. Forestry Chronicle, 39: 334-336.
- 17) 隅田明洋 (1996) 広葉樹群落の空間構造. 日本生態学会誌, 46 (1): 31-44.
- 18) 田端敬三・橋本啓史・森本幸裕・前中久行 (2004) 紵の森におけるクスノキおよびニレ科 3 樹種の成長と動態. ランドスケープ研究, 67 (5) : 499-502.
- 19) 田端敬三・橋本啓史・森本幸裕 (2015) 都市域成熟林でのアラカシ (*Quercus glauca* Thunb.), シラカシ (*Quercus myrsinaefolia* Blume) の成長に対する初期サイズ、周辺競争個体の影響. 日本緑化工学会誌, 41 (1) : 97-102.
- 20) 田端敬三・鈴木雄也・奥村博司・阿部 進 (2017) 都市近郊二次林におけるムラサキシキブ (*Callicarpa japonica* Thunb.) の開花状況とその影響要因. 日本緑化工学会誌, 43 (1) : 68-73.
- 21) 高田和彦・小林正吾 (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生長量と競争因子の関係. 日本林学会誌, 65 (4) : 113-118.
- 22) 寺島悦子・藤井英二郎・三島孔明 (2002) ケヤキ幼齢木の生長に及ぼす踏圧の影響に関する実験的研究. ランドスケープ研究, 65 (5) : 479-482.

(*印を付したものは、文献番号 6 の資料から間接的に引用した)

(2020年7月6日受理)