

# 都市樹木の温暖化適応に関する基礎研究 報告書

神戸大学農学研究科 森林資源学研究室  
修士1年 岡部桃子

## 【はじめに】

都市緑地は景観形成、気温上昇の緩和など、私たちにとって快適な都市生活に欠かせない多様な機能を果たす一方で、都市の植物は様々なストレスにさらされている (Walther *et al.* 2002 ; Trumbore *et al.* 2015). 地球温暖化による平均気温の上昇により、都市では反射や輻射熱により葉温が 50°C を超える高温に達し、葉の光合成を担う酵素や葉緑体の構造が変性して光合成機能が低下する恐れがある (Larcher 2004).

樹木は固着性の生物であり、おかれた環境でのストレスに応じて特性が短期的に変化する順化反応がみられることがある (Larcher 1999). どの程度の高温まで光合成機能を維持できるかは樹種によって異なり、高温耐性・順化能力の指標となる. 神戸市を含む都市部における都市緑地を持続的に維持するためには、生理的な順化能力と耐性を有する植物を植栽するなど、科学的知見に基づいた温暖化対策が必要である. しかし、現在進められている対策は経験則によるものが多く、科学的知見に基づいた温暖化適応策はまだ確立されていない.

日本各地で年々最高気温が上昇しており、2019年の神戸市の最高気温は 36.7°C であった. 神戸市ではクスノキなど暖温帯の常緑樹に加え、ハナミズキやケヤキといった冷温帯の落葉樹も多く植栽されており、温暖化が進むなか、市内の緑化樹木の温暖化耐性の検証、対策が急務となっている. 本研究では、幅広い環境変化に対応できる順化能力の高い樹種を見つけることで、将来的な環境変化を見据えた植栽計画の指標をつくることを目的とし、高温に対する緑化樹木の順化様式を定量的に評価した.

## 【調査対象・方法】

2019年4~7月に落葉樹2種 (ハナミズキ (*Cornus florida* L.), ケヤキ (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino)), 常緑樹4種 (タブノキ (*Machilus thunbergii* Sieb. et Zucc.), トウネズミモチ (*Ligustrum lucidum* Ait.), ネズミモチ (*Ligustrum japonicum* Thunb.), ヤマモモ (*Morella rubra* Sieb. et Zucc.)) の苗木を、温室内の対照区および温室内に小型温室を置いた加温区にて生育させた. 測定は7月下旬に行った.

測定の前日に苗に灌水を行い、室内の暗所で一晩飽水させ、携帯型光合成蒸散測定装置 (Li-6400, Li-Cor Inc.) を用いて光合成速度 ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) を測定した. 各個体から当年葉を1枚選び、 $2 \times 3\text{cm}$  のチャンパーにはさみ、LED光源 (Li-6400-02B, Li-Cor Inc.) を用いて、 $600\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  から最大  $1300\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  程度まで光合成有

効光量子束密度 (PPFD,  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) を変化させ、光合成速度が飽和状態になるまで測定した。CO<sub>2</sub> 濃度は Reference を 400ppm に設定し、測定は各光強度で 10 回程度行い、最大光合成速度 ( $A_{\text{max}}$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) の値を得た。光合成が飽和した光強度以降はチャンバー内の Block 温度を 15°C から 40°C 程度まで変化させ、葉の温度 ( $T_{\text{leaf}}$ ) と各葉の  $A_{\text{max}}$  との関係を得た。二次回帰を用いて  $T_{\text{leaf}}$  と  $A_{\text{max}}$  の関係の解析を行った。

$$A_{\text{max}} = a (T_{\text{leaf}} - T_{\text{opt}})^2 + b \quad (\text{式 2})$$

式 2 のグラフの頂点、つまり  $A_{\text{max}}$  が最も高い点の最適温度を  $T_{\text{opt}}$  と定義した。a, b,  $T_{\text{opt}}$  の各パラメーター推定値の 95%信頼区間を Excel 2018 (Microsoft) を用いた回帰分析により求めた。対照区と加温区の推定値の信頼区間が重複しない場合、両者は有意に異なるとみなした。

対照区と加温区において、 $T_{\text{opt}}$  に有意差が見られた場合、熱順化したと評価した。また、 $T_{\text{opt}}$  と二次曲線の凸度  $|a|$  を種間で比較し、気温差による熱ダメージや高温に対する順化様式の違いを評価した。

## 【結果】

対照区と加温区の気温は、平均気温で約 2°C、日最高気温平均で約 5°C の差があった。

加温に対する光合成順化のパターンは種によって異なっていた (図 a-d)。ケヤキ・トウネズミモチ・ネズミモチの  $T_{\text{opt}}$  は、加温区で有意に高い値を示した (図 a,b,  $P < 0.05$ )。  $T_{\text{leaf}} - A_{\text{max}}$  の二次曲線の凸度  $|a|$  は、トウネズミモチとヤマモモで有意に減少した (図 c,  $P < 0.05$ )。  $|a|$  の値の減少は、温度の上昇に伴う  $A_{\text{max}}$  の減少が少ないことを示す。ケヤキでは加温区で全体的に  $A_{\text{max}}$  の増加がみられたが、タブノキでは  $A_{\text{max}}$  が減少した。ハナミズキは、処理間で  $T_{\text{leaf}} - A_{\text{max}}$  の関係に違いはなかった (図 d)。

## 【考察】

光合成の最適温度の測定を行った 6 種のそれぞれは、温度操作試験に対して種ごとに異なる応答を示した。

本研究では、トウネズミモチ・ネズミモチ・ケヤキの光合成の最適温度 ( $T_{\text{opt}}$ ) が加温区で有意に高くなった。また、ケヤキでは光合成速度 ( $A_{\text{max}}$ ) が加温区で有意に高くなっていた。 $T_{\text{opt}}$  の上昇は、新たな温度環境において温度に対する  $A_{\text{max}}$  の応答を最適化するための順化であり、 $A_{\text{max}}$  の上昇は、新たな温度環境において植物が光合成能を低下させないために必要な順化である (Way and Yamori 2014)。この 2 つの順化様式は、新たな温度環境で植物が効率的に成長するために必要な応答であるとされており、高温ストレスとなりうる温度上昇に対応するだけでなく、成長の維持または増加に寄与すると考えられている (Way

and Yamori 2014).

タブノキの  $A_{\max}$  は、対照区よりも加温区で低い値を示した。Sage and Kubien (2007) は、成長環境が低温または高温の限界に近づくにつれて  $A_{\max}$  が全ての温度で低下することを示唆しており、本研究のタブノキでは、加温区の高温環境がタブノキに生理障害を引き起こし、 $A_{\max}$  の値が低くなったと考えられる。このことから、タブノキのように暖温帯～亜熱帯原産の樹種でも高温耐性が高いとは限らないことがわかった。また、ハナミズキは温度操作試験での温度上昇に対して、 $T_{\text{opt}} \cdot A_{\max}$  の順化はみられなかったため、高温に対する光合成の順化能力は低いと考えられる。

トウネズミモチ・ヤマモモは、二次曲線の凸度  $|a|$  が低下しており、温度上昇に対する  $A_{\max}$  の低下を抑え、高い  $A_{\max}$  を維持することができていた。一般に光合成速度は、測定温度を上げると最適な速度まで増加し、その後低下してゆく (Berry and Bjorkman 1980)。トウネズミモチとヤマモモは、 $A_{\max}$  の低下を抑える順化が起これ、高温での高い  $A_{\max}$  の維持が実現したと考えられる。現在報告されている高温に対する一般的な光合成の順化反応は、 $T_{\text{opt}}$  の正方向への移動、または最適温度での  $A_{\max}$  の上昇のいずれかであり (Way and Yamori 2014 ; Cunningham and Read 2002 ; Gunderson *et al.* 2010)、本研究では高温になっても高い  $A_{\max}$  を維持するという、これまでに報告のない順化反応が観察された。

本研究より、タブノキのような暖温帯～亜熱帯原産の樹種でも高温耐性が高いとは限らず、温かい地域原産の樹種であっても高温耐性が高いとは限らないことが示された。また、本研究においてタブノキ・ハナミズキは高温に対する順化能力が低く、高温環境には適さない樹種であることが分かった。一方、ケヤキ・ヤマモモ・ネズミモチは高温に対する順化能力は高く、温暖化適応策には有効な樹種であると考えられる。トウネズミモチに関しても高温に対する順化能力を示したが、トウネズミモチは中国原産の外来種であるため、本種を積極的に緑化現場で利用することは避けるべきである。

今後は本研究で開発した手法を用いて、高温に対する緑化樹木の順化能力および耐性を定量的に比較・検討し、各樹種の生理特性に基づいた緑地計画を立案することで、より効果的な温暖化適応策が実現できると期待される。

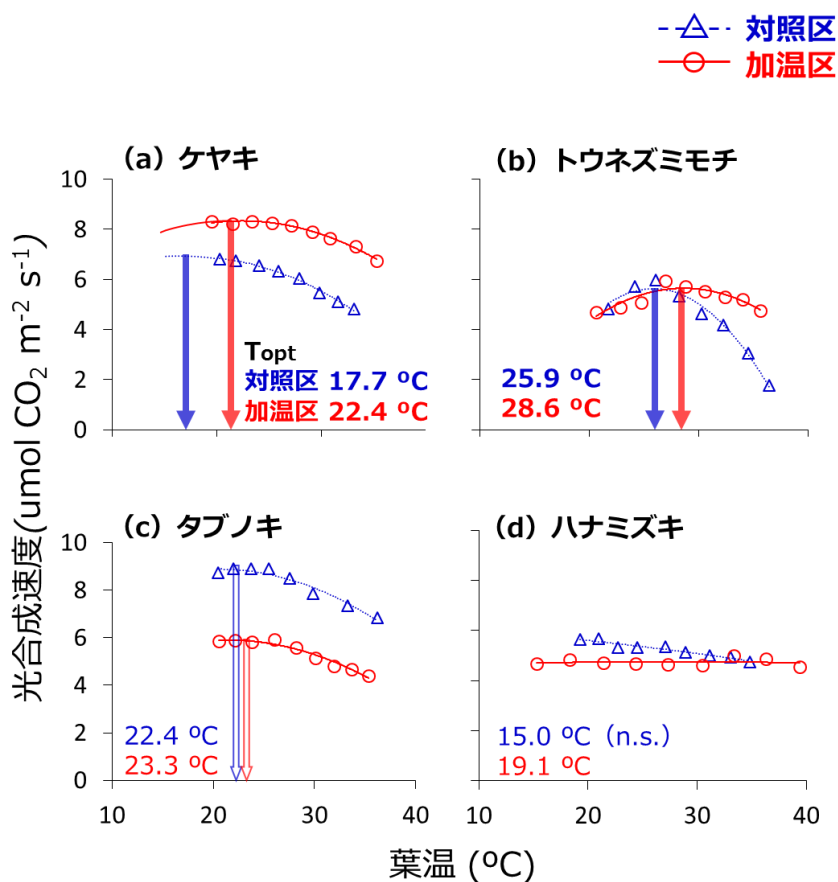


図. 温室試験のケヤキ・トウネズミモチ・タブノキ・ハナミズキの葉温と最大光合成速度 ( $A_{max}$ ) の関係. 各樹種の光合成の最適温度 ( $T_{opt}$ ) を各グラフに矢印と値で示す.

#### 【引用文献】

- Berry J, Bjorkman O (1980) Photosynthetic Response and Adaptation to Temperature in Higher Plants, *Annual Review of Plant Physiology* 31 : 491-543
- Cunningham S, Read J (2002) Comparison of temperate and tropical rainforest tree species: photosynthetic responses to growth temperature, *Oecologia* 133 : 112-119
- Gunderson CA, O'hara KH, Campion CM, Walker AV, Edwards NT (2010) Thermal plasticity of photosynthesis: the role of acclimation in forest responses to a warming climate, *Global Change Biology* 16 : 2272-2286
- Larcher W (2004) 植物生理生態学 第2版, Springer (佐伯敏郎・館野正樹 監訳) : 249
- Larcher W (1999) *Physiological Plant Ecology* 4<sup>th</sup> edition, Springer : 345-348
- Sage RF, Kubien DS (2007) The temperature response of C3 and C4 photosynthesis, *Plant, Cell & Environment* 30 : 1086-1106
- Trumbore S, Brando P, Hartmann H (2015) Forest health and global change, *Science* 349 : 814-818

Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change, *Nature* 416 : 389-395

Way DA, Yamori W (2014) Thermal acclimation of photosynthesis: on the importance of adjusting our definitions and accounting for thermal acclimation of respiration, *Photosynthesis Research* 119 : 89-100