年間を通じた気温の上昇がアカマツの成長におよぼす影響

中島敦司¹⁾・山本将功²⁾

1) 和歌山大学システム工学部 Faculty of Systems Engineering, Wakayama Univ.
nakat@sys.wakayama-u.ac.jp

2) 和歌山大学大学院システム工学研究科 Grad. School of Systems Engineering,
Wakayama Univ.

摘要: 本研究では、年間を通じた気温の上昇がアカマツの成長におよぼす影響を、外気温に対して-1.5 °C, ±0.0 °C, +1.5 °C, +3.0 °C, +4.5 °Cを加温などする人工気象室を用いた育成実験によって検討した。その結果、加温開始2年目の春の成長開始時期には処理区間で違いがみられず、冬芽の休眠解除における低温不足から、高い温度区では開芽可能温度の低下が進まないことが明らかとなった。また、一次伸長量、針葉束数は、+4.5 °C区で小となった。これは、高温条件下では、前年の葉原基形成の活性抑制があることで翌年の一次伸長量が大きくならないことと、土用芽の発生が促進されることで翌年の伸長部位を使用してしまうことの両方の影響の結果と考えられた。

キーワード: アカマツ, 温暖化, 成長, 土用芽, 休眠

NAKASHIMA, Atsushi and YAMAMOTO, Masanori : **Effects of year-round warming on the growth of *Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC**

Abstract : Growth of *Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC. seedlings were investigated grown under several controlled temperature conditions of outdoor temperatures altered by +4.5 °C, +3.0 °C, +1.5 °C, 0.0 °C and -1.5 °C. As a result, growth initiation timing became the same among treatments. Dormancy of winter buds were not released much because of shortage of winter chilling in the high temperature treatments. Shoot length and the number of needle leaves became to be smaller under +4.5 °C treatment caused by inhibition of leaf primordia formation and elongation of lammas shoot under warmer condition in the previous year.

Key words : *Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC., warming, growth, lammas shoot, dormancy

1. はじめに

近年、環境におよぼす地球温暖化の影響が危惧されている。このような中、森林や緑地の受ける温暖化の影響についても予想されている^{1,2,13)}。しかし、それらの多くは、理論と学説の組み合わせによるものであり、実証的なデータでの検討に乏しく、マクロな視点での予測が多い。緑地の管理技術への適用に対しては、種、個体レベルでの予測が重要であり、そのためには種、個体の受ける影響についての実証研究が求められる。これまでも、気温上昇が樹木個体の成長におよぼす影響について、育成実験などによる実証研究が行われているが、それらの多くは、恒温条件など自然界ではありえない条件設定によるものにとどまっている^{3-8,12,20)}。自然界では、気温が常に変動しているため、それらの結果は自然界における再現性の面で課題を含んでいる。

このような状況の中、筆者らは、これまで、外気温に対し、常に数℃を加温できる人工気象室を用い、その中で数種の温帯樹木を育成し、それらの成長や生物季節が受ける影響を報

告してきた。そして、各樹種に共通した傾向としては、3℃を上回る温暖条件下で育成した場合、1) 成長期間の長期化、特に成長停止の遅延、2) 樹高伸長量および年間伸長（フラッシュ）回数の増加、3) 葉の小型化と枚数の増加、それにとともなう個体当たり葉面積の増大、4) 土用芽の頻発や不時開芽、あるいは落葉樹における秋期以降の離層未発達にとともなう着葉越冬などのフェノロジー異常、5) 夏季の光合成速度および蒸散速度の低下、6) 春季の成長再開に要求される有効積算温度の増加、などの反応を示す樹種が多いことを明らかにした^{9-11,14,15,18,19)}。

本研究では、過去に報告していなかったアカマツを取り上げ、年間を通じた気温の上昇が、固定成長する本種の成長におよぼす影響について調べたので、結果を報告する。

2. 材料および方法

実験は、和歌山県和歌山市に設置した自然採光型のグロースチャンバー（縦1.8 m×横1.8 m×高さ2.1 m）5基を用い

て行った。これらは、実測した野外の気温、湿度のデータを自動的にオンラインで受信し、それらの条件を高精度で再現できる性能を有する他、一定の温度、湿度勾配を設定することができる実験装置である。本研究での育成実験におけるチャンバーの設定温度は、常に野外の気温より1.5℃低い条件（-1.5℃区）、対照区に相当する野外の気温と同一とした条件（±0.0℃区）、常に野外の気温よりそれぞれ1.5、3.0、4.5℃高い条件（+1.5℃区、+3.0℃区、+4.5℃区）の5種類とした。気温が変動するため、大気飽差を処理区間で統一できなかったが、湿度は野外と同一となるように自動制御した。さらに、実験を自然日長条件下で行うため、チャンバーは周辺に夜間照明がなく、周辺建物の窓などからの漏洩光の影響のない位置に設置した。なお、本研究では、チャンバー内と風などの条件が異なる野外区は設けなかった。

供試植物には、育成実験を行なった和歌山市とほぼ同緯度の三重県鈴鹿市にて採種したアカマツ（*Pinus densiflora* SIEB. et ZUCC.）の5年生実生苗を用いた。供試植物の播種は、マサ土にパーミキュライトを容積比で3：1に混合した用土を満たした60 cm×30 cm×10 cmの育苗箱で行ない、翌年には、直径9 cmの黒色ビニールポットに1個体ずつ鉢上げした。さらにその翌年に、直径15 cmの黒色ビニールポットに鉢上げした。供試個体を育成したポットの用土は、マサ土にピートモスを容積比で2：1に混合したものとした。

2000年6月1日、樹高40 cm～45 cmにある75個体を選び、上記5つのチャンバーへそれぞれ15個体ずつ搬入した。その後、チャンバー内での育成を続け、冬期を経過した搬入2年目の2001年3月1日から、ノギスによって頂芽長を毎日測定した。頂芽長に変化のみられた開芽日以降は、頂芽から伸長した主軸長を1週間ごとに計測し、この一次伸長の計測期間は、主軸長の変化が3週連続してみられなくなるまでとした。また、夏季に、翌年に開芽、伸長する頂芽の基部が緑色に変化した際には、土用芽としての二次伸長開始とし^{3,4)}、冬芽基部より先端までの長さを1週間ごとに計測した。この計測期間も、長さの変化が3週連続してみられなくなるまでとした。

表-1 温暖化がアカマツの成長におよぼす影響

Table 1 Effect of warming on the growth of *P. densiflora*

	-1.5℃区	±0.0℃区	+1.5℃区	+3.0℃区	+4.5℃区
一次伸長の期間の長さ（日数）	57.9 a	60.8 a	45.3 b	45.1 b	38.9 c
一次伸長量（mm）	99.1 a	97.3 a	90.8 a	83.1 b	68.9 c
一次枝における葉を着生した部分の長さ（mm）	71.4 a	68.6 a	63.6 a	56.1 ab	44.7 b
一次枝における葉なし部分の長さ（mm）	27.6 a	28.8 a	27.2 a	27.0 a	24.2 a
一次枝に着生した針葉束の数	60.8 a	60.6 a	59.1 a	61.3 a	37.0 b
一次枝に着生した針葉束の長さ（mm）	94.9 a	96.1 a	96.8 a	94.6 a	95.0 a
土用芽の発生数（10個体あたりに換算）	0	2	2	6	5
冬季の冬芽基部から先端までの長さ（mm）	17.4 c	23.2 b	27.5 b	65.6 a	59.5 a

注1：土用芽の発生数以外の数値は、前年に土用芽として二次伸長した個体を除いて求めたもの

注2：表内記号は、Tukey-Kramer 検定の結果（ $p < 0.05$ ）， $a > b > c$

一方、二次伸長も完全に終わった11月に、一次枝の葉なし部分と葉を着生した部分のそれぞれの長さを測定し、その後、針葉束数を数え、1個体当たり20個の針葉の長さを測定した。

なお、供試植物の肥培管理としては、各年の5月中旬と8月中旬に肥効が90日タイプの化成肥料（N：P：K＝10：10：10）を1ポット当たり10 gずつ与えた。水管理は、毎日1回のスプリンクラー灌水によって行い、1個体に対する灌水量は4～9月で1日当たり200 cc、それ以外の期間では100 ccとし、昼間の土壌水分が40%を下回らないようにした。

3. 結果および考察

図-1に、各区における春の開芽率の変化を示した。これによると、供試植物の開芽、伸長開始時期は設定温度の違いに関わらず概ね同じ時期であった。この結果は、設定温度の高い区では、温度の低い区と比べ、より高い温度条件下で伸長を開始したことを示している。したがって、夏季、秋季、冬季を通じた気温の上昇によって、翌春の開芽可能温度¹⁸⁾の低下が抑制されると考えられた。このことは、冬芽の休眠解除における低温不足の結果と理解され、他の温帯樹種でみられた現象^{9-11,14,15,18,19)}と同じであると判断された。

図-1 温暖化がアカマツの成長開始におよぼす影響

Fig. 1 Effect of warming on the first growth initiation of *P. densiflora*

図-2 温暖化がアカマツの一次伸長におよぼす影響

Fig. 2 Effect of warming on the first shoot elongation of *P. densiflora*

図-2に、供試植物の一次伸長の変化を示した。これによると、+3.0℃区と+4.5℃区において、大きく伸長する個体が見られなくなることがわかる。さらに、+4.5℃区では、ほとんど伸長しない個体が多くみられた。このような個体は、前年に土用芽として二次伸長した個体であり、調査前年に伸長する部位の一部を展開してしまった個体であった。このた

図-3 針葉束数と一次枝長の関係

Fig. 3 Relation between number of needle leaves and first shoot length

め、少なくとも、前年に二次伸長した分だけは翌春の一時伸長量が小さくなったと考えられる。また、前年に土用芽を発生させなかった個体でも（表-1）、一次伸長量は大きくはなかった。これらが合わさった結果として、一次枝の長さは、設定温度が高くなるほど短くなった。

また、各区における一次伸長の期間の長さをみると、設定温度が高くなるにしたがって、前年に土用芽を発生させなかった個体でも伸長期間が短くなる傾向が認められた（表-1）。

一方、各区における成長停止後に計測した冬芽基部から先端までの長さは、+3.0℃区と+4.5℃区で大となった。二次伸長、すなわち土用芽発生の内訳をみると、-1.5℃区では発生無し、±0.0℃区では10個体中2個体、+1.5℃区では同2個体、+3.0℃区では6個体、+4.5℃区では5個体に換算された。このことから、設定温度が高い区では、土用芽が発生しやすくなったことで、二次伸長し、冬芽基部から先端までの長さが大きくなったと判断された。この結果は、アカマツの土用芽が高温条件下で発生しやすいことを示した櫛田ら^{3,4)}の報告を支持するものであった。

アカマツの土用芽は、秋～冬季に冷温障害を受けやすくなることに加え、翌春の伸長量を小さくしてしまうなど、成長に対してマイナスに作用することが知られている^{3,4,16)}。したがって、年間を通じた気温の上昇は、アカマツの一時次伸長を悪化させるばかりか、秋～冬季に冷温障害を受けやすくなる可能性が高くなると考えられた。

次に、各区における一次枝に着生した針葉束数をみると、+4.5℃区において針葉束数が少なくなる結果となった（表-1）。一次枝に着生した針葉束の葉原基形成が前年であること^{3-6,20)}を考えると、+4.5℃区では、葉原基形成が抑制された可能性が考えられる。そこで、針葉束数と一次枝の長さの関係を見ると、正の相関が認められた（図-3）。そこで、

一次枝の針葉束の着生部位の長さを針葉束数で除し、葉間長を指標する値を求めたところ、処理区間での違いが認められなかった。この結果、+4.5℃区で一次枝の長さが短くなったという結果は、前年に形成された葉原基の数が少なかったことが主に影響したことによると考えられた。

このことを裏付けるため、各区における前年に土用芽を発生させなかった個体の一次枝の葉なし部分^{5,6,20)}と葉を着生した部分の長さを比較すると(表-1)、葉無し部分の長さには処理区間で差がなく、このため、針葉束を着生した部分の長さが一次枝の長さの違いに影響したと判断された。一方、各区における針葉の長さには差がないことから、前年の葉原基形成の活性低下、つまり針葉束数の減少が春季の一次伸長量に影響するとみられた。

したがって、夏季の高温は、アカマツの葉原基形成を抑制し、結果として翌春の一次伸長量を小さくすると考えられた。同時に、土用芽として二次伸長する個体を増やしてしまい、翌春の一次伸長量は、平均としてさらに小さくなるとみられた。アカマツが固定成長型の樹種であること^{3-6,20)}と、先駆樹種¹⁶⁾であることを考えると、春季の一次伸長量が小さくなるということは、樹林の中における、他種との、他個体との競争に勝ち残りにくいことを示すもので、少なくとも、固定成長樹種としては成長に有利に作用する可能性は低いと考えられた。

4. まとめ

本研究の結果、年間を通じた気温の上昇は、アカマツの成長に対して、以下のように影響をおよぼすと考えられた。

- 1) 冬季の低温不足から冬芽の休眠解除が進まず、春の開芽可能温度があまり低下しない。このため、冬芽の開芽に際して、高い温度を要求する。
- 2) 前年の夏季の冬芽内での葉原基形成が抑制され、その結果、翌春の一次伸長量が小さくなる。
- 3) 土用芽として二次伸長しやすくなり、このような個体では、翌春の一次伸長量が小さくなる。

以上のことから、地球温暖化による年間を通じた気温の上昇は、樹林内に成育する固定成長型樹種アカマツの成長に対して有利に作用する可能性は低いと考えられた。

引用文献

- 1) IPCC Subgroup on Agriculture, Forestry, and Other Human Activities of Working Group III (1990) Report of the Subgroup on Agriculture, Forestry and Other Human Activities. 85pp.
- 2) Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C. I. A. (2001) Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge, Cambridge University Press, 881 S., UB, TX 2001/2270, FB, 1390/92, IPCC report.
- 3) 櫛田達也・中島敦司・永田洋 (1999) 春季の加温処理によるアカマツの土用芽の誘導, 日林誌 81, 57-64.
- 4) 櫛田達矢・中島敦司・永田洋 (1999) アカマツの土用芽の発生と翌春の雄花と雌花の開花の関係, 日林誌 81, 109-115
- 5) Nagata, H. (1967) Studies on the photoperiodism in the dormant bud of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. (I) Effects of photoperiods on the growth of first - and second - year seedlings of *P. densiflora*. J. Jpn. For. Soc. 49, 279-285.
- 6) Nagata, H. (1968) Studies on the photoperiodism in the dormant bud of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. (III) Photoperiodism in the terminal buds of the second-year seedlings. J. Jpn. For. Soc. 50, 174-180.
- 7) 永田洋・万木豊 (1986) アカマツにおける枝無し連続生長の誘導, 日林誌 68, 397-405.
- 8) Nakashima, A., Kushida, T., Yabu, S., and Nagata, H. (1998) Effects of winter chilling on the flowering and shoot elongation of *Rhododendron indicum* Sweet. Environmental Engineering Research Vol.35, 477-485.
- 9) Nakashima A., Kushida T., Tokura T., Nakao S., Yamada H., Matsumoto K., Yamada K. and Yabu S. (2002) Blooming and flower morphology of *Camellia hiemalis* grown under warmer condition, J. Environ. Syst. and Eng., JSCE, 171-176.
- 10) 中島敦司・永田洋 (1995) 開芽からの恒温条件がサザンカの開花, 土用芽の発生におよぼす影響, 日林誌 77: 254-259.
- 11) 中島敦司, 中尾史郎, 山田宏之, 山田和司, 養父志乃夫 (2002) 温暖化に伴う温度上昇がサザンカの開花におよぼす影響, 日本造園学会ランドスケープ研究 64 (5), 471-475.
- 12) 中島敦司, 養父志乃夫, 櫛田達矢, 永田洋 (1997) サザンカにおける土用芽の発生と花芽の形成および開花の関係, 日林誌 79, 69-75.
- 13) 中島敦司, 万木豊, 永田洋 (1994) 夏季の温度および日長がサザンカの開花におよぼす影響, 日林誌 76, 584-589.
- 14) 奥田尚孝・中島敦司・櫛田達矢・中尾史郎・山田宏之・養父志乃夫 (2003) 異なる温度条件下で育成したコナラの成長と生物季節現象, 環境工学研究 40, 257-262.
- 15) 奥田尚孝・中島敦司・中尾史郎・山田宏之・養父志乃夫 (2003) 温暖条件下で育成したコナラの成長, 環境システム研究 31, 145-150.
- 16) 佐藤大七郎, 堤利夫 (1978) 樹木, 形態と機能, 文永堂, 東京, 309pp.
- 17) Vegis, A. (1964) Dormancy in higher plants. Ann. Rev. Plant Physiol. 15, 185-224.
- 18) 山本将功・中島敦司・櫛田達也・中尾史郎・山田宏之・養父志乃夫 (2003) 年間を通じた温暖条件下で育成したブナの成長と生物季節, 環境工学研究 31, 263-268.
- 19) 山本将功・中島敦司・奥田吾記・奥田尚孝・櫛田達矢 (2004) 年間を通じた温暖条件下で育成したスギの成長と生物季節現象, 環境工学研究 41, 645-650.
- 20) 万木豊・永田洋 (1987) 12時間日長でのリュウキュウマツの枝無し連続生長の誘導, 日林誌 69, 236-239.

(2006.7.4 受理)