

早成樹種の成長量を最大にする造林方法（1）

適地適木

斎藤昌宏^{*1}・平松直樹^{*1}・河原崎里子^{*2}・

相川真一^{*2}・宇都木玄^{*2}・田内裕之^{*2}

1. はじめに

熱帯地域、亜熱帯地域、半乾燥地域などではさまざまな樹種が植林されている。これらの樹種は単に緑化のためだけではなく、ある時は燃料材として、ある地域ではパルプ原料として利用することも念頭においている。そのため、その土地の環境に適しているだけではなく、成長が早いことを基準に早成樹を選定している例が多い。すなわち、成長が早く、短期間でバイオマスを蓄積すること、成林の早いことが早成樹の特徴である。一方、成長が早くても生育できる環境条件の範囲が狭いと、いろいろな場所に植栽することができない。あるいは特定の環境条件を満たしていれば成長は旺盛だが、そのような環境条件から外れた場合には成長速度が急激に低下するような種類は歓迎されないことになる。これらのことから、熱帯、亜熱帯、半乾燥地に植栽される主な早成樹種はアカシア類、ユーカリ類などに絞られることになる。

早成樹種の成長量を調べると、植栽場所、植栽方法などによってさまざまな値となる。植物の成長に影響を与える要因としては、光、温度、水、二酸化炭素濃度、土壤の保水性、通気性などの物理的要因、土壤中の養分量、pH、塩濃度などの化学的要因、さらに植物個体の年齢、個体密度などが考えられる。一方、光の量、温度、降水量、二酸化炭素濃度などは現在の技術では制御が困難であるが、個体への光の配分（植栽密度、間伐方式）、養分量の追加（施肥）、水の供給（灌水）などは技術・コストなどの制約があるものの、制御を行うことは可能である。すなわち、現在の造林技術では、(1) その土地の条件に適した樹種

Masahiro Saito, Naoki Hiramatsu, Satoko Kawarasaki, Shin-ichi Aikawa, Hajime Utsugi and Hiroyuki Tanouchi : Plantation Methods for Maximizing the Mean Annual Increment of Fast-Growing Trees (1) Right Tree for Right Site

*¹三重大学生物資源学部、*²(独)森林総合研究所

の選定（適地適木），(2)植栽樹種に適した植林および保育法の適用，(3)効率的な栽培期間を工夫することによって、最大限の成長量を得るはずである。

では、それぞれの早成樹種が持つ最大限の成長量とはどの程度の値なのであろうか。また、どのような造林法が最大の成長量をもたらすのであろうか。それを明らかにするため、既存のデータを次のような方法で解析することとした。資料の解析には年平均気温、年降水量など気候要因とそれぞれの樹種の成長量との関係を解析し、早成樹種それぞれの最適な生育条件を明らかにする方向と、造林方法の違いによってどのように成長量が変化するかを解析し、それぞれの樹種にとって最も適した造林方法を明らかにする方向と考えられる。ここではそれぞれの樹種に「最適な気候環境」と「成長量を最大にするための造林技術」を明らかにし、それぞれの樹種が気候・土地条件が最適である場合には、最大でどの程度の成長量を示すのかを明らかにすることとした。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構によるバイオマスエネルギー先導技術研究開発に採択された「荒漠地における持続可能型バイオマスエネルギー資源創出技術の研究開発」（平成17～18年）の成果の一部である。

2. 調査対象とした資料および解析方法

早成樹植林地の成長データを収集する資料として次の文献を利用した。1) “Tecnologia de la Forestacion en Argentina y America Latina”¹⁾、この本にはアルゼンチンを中心に、ブラジル、チリなど南米で行われた産業植林の例が多数示されている。2) 「産業植林 CO₂ 固定化評価等に関する調査研究報告書」^{2,3)}、オーストラリア、ベトナムなどにおける産業植林の例が記録されている。3) 「熱帯林の成長データ集録」^{4,5)}、このデータ集は“その1”，“その2”的2分冊となっており、国際緑化推進センターから刊行された。熱帯地域に位置する国々で行われた植林の結果から、成長データを広く収集している。

植栽地の温度と降水量、造林技術および成長量の関係を解析するには、植栽地の気候条件、造林方法および成長量がセットとして記録されているデータを収集する必要がある。植栽地の気候は、一般には年平均気温と年降水量として記載されている例が多いと考えられたが、実際にデータを検討してみると、植栽地の地名だけしか記録されていない報告が大部分であった。そこで、植栽地の地名から、周辺で気象観測値が公表されている最も近い都市を調べ、その値を代用した。最寄りの都市の年降水量および年平均気温のデータはWorld-Climate⁶⁾により求めた。年平均降水量および年平均気温の平年値は最近10年

間の値を利用したが、実際の植栽期間は植栽地によって異なっており、気候の年平均値とは時期が異なっている。

土壤の養分量、保水性などはほとんどの例では記録されていない。産業植林の場合には大面積に植林するため、土地的要因は植栽地の中でバラツキが大きく、正確な情報を得にくいためであろう。また、これらの土壤要因は植栽地への施肥、耕耘などによって改良できることから、ここでは成長量を規定する重大な要因から除外した。

大径材を生産するための植林では、なるべく早く林冠が閉鎖することを念頭において植栽密度を決定していることが多い。また、収穫までに長期間を要し、その間に何度も間伐するため、初期の植栽密度はその後の林分の成長よりも伐期における個体の形状に大きな意味を持つ。しかし、ここで対象とする早成樹種の産業造林、特にバイオマスを優先させる植林では短期間に大きな収量を得るために植栽密度と栽培期間の長さが大きな問題となる。そこで、栽培期間と植栽密度および成長量の値が揃っているデータを収集することとした。成長量の記載には2方法があり、それは植栽後一定期間を経過した後の1年間の成長量を示している場合（連年成長量）と植栽時から一定期間経過後の総成長量を示している場合（[平均成長量=期間内の総成長量を年数で除した年成長量]を示した例を含む）であった。ここでは、栽培期間内で最も大きな成長量を求めることから後者のデータを採用し、栽培期間中の年平均成長量 ($m^3/ha/yr$) を指標として密度 (N/ha) と栽培期間 (年) の関係を求めることとした。また、同じ地域で複数の植林結果が示されている場合には、年平均成長量が大きいデータを採用した。植栽密度、栽培期間が同じであっても地位が異なると年平均成長量は異なるが、この場合も地位が高く年平均成長量が大きい植林例を採用し、解析資料とした。植栽されている樹種についても、細かく見れば品種あるいは育種系統が異なっていると考えられるが、資料にはそこまで詳細には記録されていない。一部には改良品種あるいはハイブリッドの植林記録があったが、数は少なく、どのように扱うべきか判断がつかなかったため、除外した。

ここまで述べてきたように、(1)植栽地（あるいはその周辺の気象観測地）における年降水量および年平均気温のグラフ上に年平均成長量の値を示すことにより、それぞれの樹種の植栽適地を明らかにした。(2)栽培期間内の年平均成長量が示されており、また収穫時の密度が明らかであるデータを用い、栽培期間 (年) と収穫時の密度をそれぞれ x 軸、y 軸とし、そこに年平均成長量の等値線を描くことにより、最大の成長量を示す栽培期間と植栽密度の範囲を明らかに

した。等値線は統計ソフト（JUMP Ver. 5.1, SAS Institute Japan）を用いて描いた。

3. 結果と考察

1) *Eucalyptus globulus* の栽培適地

前述のように年平均気温と年降水量および年平均成長量のデータが揃う資料は少なく、10数種の早成樹のうち *Pinus radiata*, *Eucalyptus grandis*, *E. camaldulensis* および *E. globulus* の4種のみが10~12組のデータを集められた。

これらのデータをもとに4

樹種の年平均成長量を、横軸に年平均気温、縦軸に年降水量を示したグラフに展開し、図1~図4に示した。図中の黒丸の位置は植栽地の年平均気温と年降水量を示し、数値は年平均成長量の値（小数点以下は四捨五入し、単位は $m^3/ha/yr$ ）

を示す。*P. radiata* は年平均気温 $12.4^{\circ}C$ 、年降水量 $1,270\text{ mm}$ で年平均成長量は最大となり $35 m^3/ha/yr$ となっている。一方、*E. grandis* は年平均気温 $21.1^{\circ}C$ 、年降水量 $1,647\text{ mm}$ で年平均成長量 $67.8 m^3/ha/yr$ と最大値を示した。成長量が第2位の地域は年平均気温 $21.4^{\circ}C$ 、年降水量 $1,540\text{ mm}$ で年平均成長量 $52.4 m^3/ha/yr$ となっている。

後述する他のユーカリ属樹種と比較して、成長量

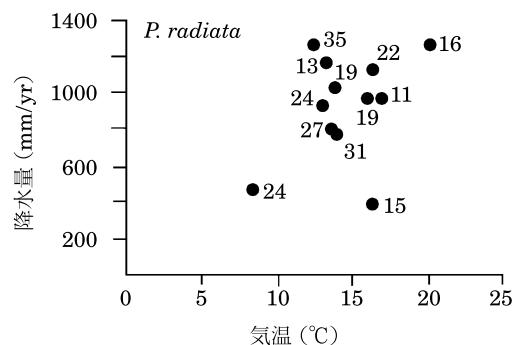


図 1 *P. radiata* の年平均成長量 ($m^3/ha/yr$) と年平均気温・年降水量との関係

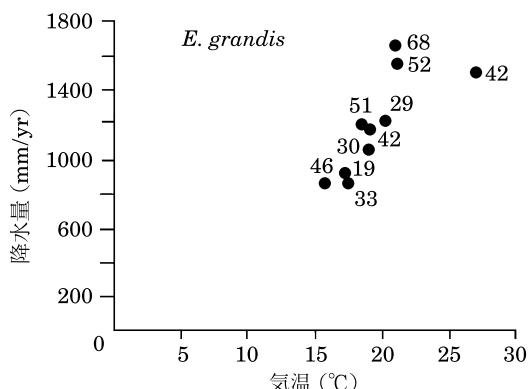


図 2 *E. grandis* の年平均成長量 ($m^3/ha/yr$) と年平均気温・年降水量との関係

が大きい地域は高温多雨側に偏っていることがわかる。Carlowitz⁷⁾は *E. grandis* の植栽範囲を年降水量 850～2,131 mm, 年平均気温 19.6～22°C としており、最適な気候は年降水量が 1,353 mm, 年平均気温は 20.8°C としている。最大成長量を示す地域の気候は今回の結果とほぼ重なっている。*E. camaldulensis* では年平均気温 15.9°C, 年降水量 960 mm で年平均成長量が最大となり、47.8 m³/ha/yr を示している。本種は熱帯地域に広く植林されているが、実際には本来の生育地である乾燥地、半乾燥地の気候で最大の成長を示すのであろうか。同様に Carlowitz によれば、*E. camaldulensis* の植栽範囲は年降水量 246～1,726 mm, 年平均気温 17.5～28.0°C とし、最適な気候は年平均気温 23.0°C, 年降水量 815 mm としている。年降水量は多少ずれ、年平均気温は大幅にずれている。高温側でのデータが少なく、しかも集めたデータでは高温側の成長量が小さかったことが影響しているものと考えてよい。*E. globulus* も年平均気温 15.9°C, 年降水量 960 mm で年平均成長量が最大の 57.8 m³/ha/yr を示した。最大成長を示した場所の気候が *E. camaldulensis* と同じであるのは、両者の植栽場所は異なっているが、最寄りの気象観測地が同じ都市であるため気象データも同一となったことによる。Carlowitz は *E. globulus* の植栽範囲を年降水量 200～1,500 mm, 年平均気温 11.2～13.8°C

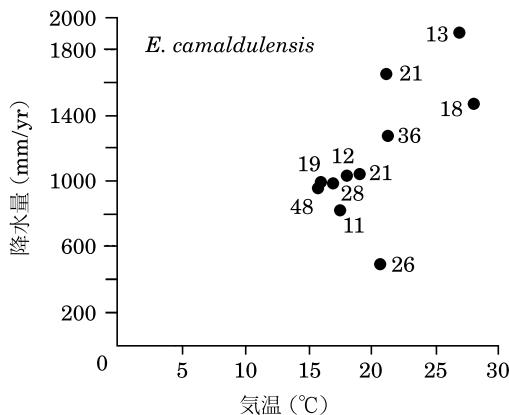


図 3 *E. camaldulensis* の年平均成長量 (m³/ha/yr) と年平均気温・年降水量との関係

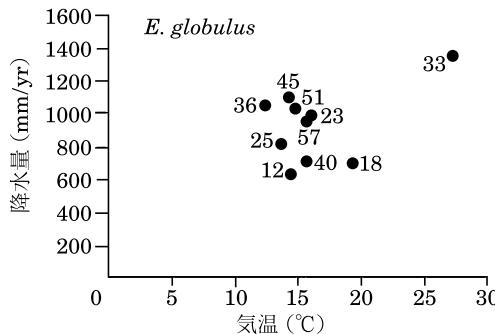


図 4 *E. globulus* の年平均成長量 (m³/ha/yr) と年平均気温・年降水量との関係

としている。*E. globulus* のデータを用いて、統計ソフト (JUMP Ver. 5.1) により年平均成長量の等値線図を描き図5に示した。最大成長量を示す範囲つまり等値線のピークは年平均気温 $13\sim15^{\circ}\text{C}$ 、年降水量 $1,000\text{ mm}$ 前後にあることがわかる。Carlowitzによると植栽適地は年平均気温 12.5°C 、年降水量 994 mm としており、図5の等値線のピークとほぼ重なっている。図5において 40 , 30 , $20\text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ の等値線が右上に引きずられているのは、年平均気

温 27°C 、年降水量 $1,300\text{ mm}$ の付近に $33\text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ の点が存在するためである(図4参照)。同様に、年平均気温 16°C 、年降水量 $1,000\text{ mm}$ の付近に $23\text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ の点が存在するため、 40 および 30 の等値線は複雑な形に変形している。また、 $51\text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ と $57\text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ の点は $45\text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ 以上の範囲に含められているとはいえる、その範囲は非常に狭いものになってしまっている。この点は統計ソフトによって機械的に等値線を描いた場合の難点であろう。しかし、より多くのデータを集め、同じ位置に複数のデータがあれば、成長量の小さいデータを棄却することで、より単純化された同心円状の等値線が描けよう。*E. globulus* 以外の樹種で同様に描いた等値線図では、はっきりしたピークは現れなかった。データが少ないため、最大の成長量を示す範囲は一方にずれており、全体が階段斜面状の等値線図になってしまったことが原因である。いずれにしても、統計ソフトを用いて描くと各点間の勾配を比例配分し、等値線を描くため、複雑で入り組んだ図形となるが、全体の傾向が読みとりやすくなることがわかる。

2) 半乾燥地、適潤地に植栽されるマツ2種の密度と栽培期間

Pinus radiata と *P. pinaster* の年平均成長量と密度、栽培期間の関係を図6および図7に示す。前者は16サンプル、後者は15サンプルであり、すべて南米で得られたデータである。ただし、ブラジルなどの熱帯・亜熱帯地域ではカ

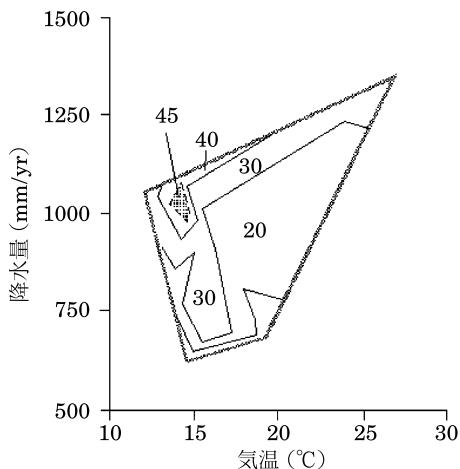


図5 *E. globulus* の成長量 ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{yr}$) 等値線および年平均気温と年降水量

リビアマツ (*P. caribaea*) およびエリオットマツ (*P. elliottii*) を植栽している⁸⁾。*P. pinaster* と *P. radiata* の成長量は主にアルゼンチンおよびチリの植林によって得られたデータである。図では年平均成長量が最も大きな値となる範囲を網掛けで示してある。*P. radiata* では植栽密度を 2,000～2,500 本/ha とし、12～17 年間栽培するときに年平均成長量が最大となり、その値は $22.5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ である。浅川⁹⁾によれば、ニュージーランドの *P. radiata* 造林地では 35～40 年生で $770 \text{ m}^3/\text{ha}$ の例があり、チリの生産力が高いサイトでは 20 年生で約 $500 \text{ m}^3/\text{ha}$ であったという。また、*P. radiata* には植栽密度は明らかではないがブラジルで $21\sim36 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ 、スワジランドでは 14 年生で $20 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ 、インドでは 19 年生で $25 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ の年平均成長量を示した記録があるという¹⁰⁾。年平均成長量が $22.5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ という値は最大値として妥当な数値であろう。同様に、*P. pinaster* では植栽密度を 1,000～1,300 本/ha とし、12～16 年間栽培するときに年平均成長量が最大となり、その値は $17.5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ である。

4. おわりに

P. radiata, *E. grandis*, *E. camaldulensis* および *E. globulus* について年降水

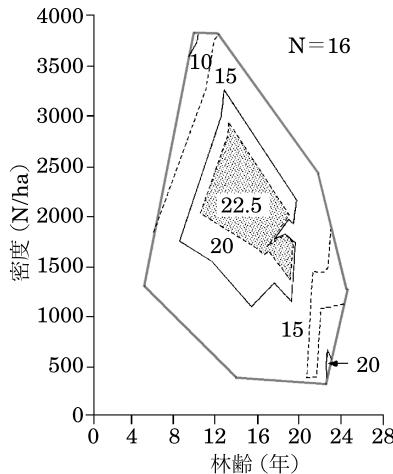


図 6 *P. radiata* の成長量と密度、林齢の関係等値線の値は年平均成長量 ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{yr}$) を示す。図 2 以下も同様。

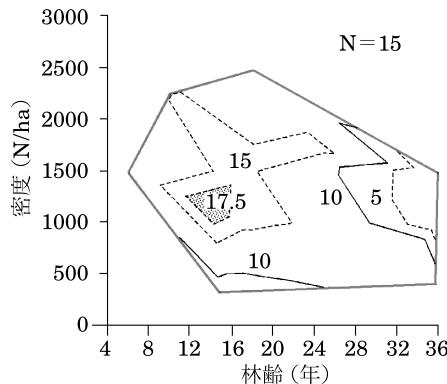


図 7 *P. pinaster* の成長量と密度、林齢の関係

量と年平均気温に対する年平均成長量の関係を解析した。*E. globulus* では最適植栽範囲が明らかとなったが、他の樹種では明瞭な傾向は示さなかった。年平均成長量と気候のデータが揃っている資料が少ないためである。一方、植栽密度、栽培期間および年平均成長量が示されている資料は比較的多いため、これら3者の関係を把握することは可能である。本稿では、*Pinus radiata* および *P. pinaster* のデータをもとに統計ソフトを用いて年平均成長量の等値線図を描いた。この図によって示された最適な植栽密度と栽培期間はこれまでに経験的に把握されていた年平均成長量が大きい植栽地の造林方法とほぼ重なっていることがわかった。

次稿では *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. globulus* の造林方法について南米とそれ以外の地域の比較を行った結果を報告する。

〔引用文献〕 1) Cozzo, D. (1976) *Tecnologia de la Forestacion en Argentina y America Latina*, Editorial Himisferio Sur. 2) 海外産業植林センター(1999)産業植林CO₂固定化評価等に関する調査研究報告書. 平成10年度. 3) 海外産業植林センター(2000)産業植林CO₂固定化評価等に関する調査研究報告書. 平成11年度. 4) 西川匡英・高橋文敏・白石則彦・増田義昭(2004)熱帯林の成長データ集録(その1), 国際緑化推進センター. 5) 西川匡英・高橋文敏・白石則彦・増田義昭(2004)熱帯林の成長データ集録(その2), 国際緑化推進センター. 6) World Climate <http://www.worldclimate.com>. 7) Carlowitz, P.G. *Multipurpose trees and shrubs—Sources of seeds and inoculants*, ICRAF. 8) 笹倉充義(1991) ブラジルにおける生松脂採集事業. 热帯林業 No. 21 : 21-26. 9) 浅川澄彦(1997) ラジアータマツ. 森徳典ほか編, 热帯樹種の造林特性第2巻 : 26-33. 10) Mead D.J. (2001) Mean annual volume increment of selected industrial forest plantation species. FAO-Forestry Department.