

アカシア・マンギウム及びユーカリプタス・ペリタ 植林は土壤養分環境にどのような影響を与えるか？

—インドネシア南スマトラ州における事例から—

佐々木卓也*¹・太田誠一*¹・沢悠希子*¹・アグス ウィチャクソノ*²

はじめに

世界的なパルプの需要拡大に伴い、東南アジア熱帯地域においてはアカシア類、ユーカリ類などの早生樹を用いた商業造林が拡大している。特にインドネシアで100万haを超えるパルプ用植林地が存在しており、そのほとんどが早生樹アカシア・マンギウムである¹⁾。

早生樹植林では、生産の最大化を図るためおよそ6~8年といった短いサイクルで植林-伐採が繰り返され、収穫時には材と共にその中に含まれる養分も同時に系外へ持ちだされる。そのため早生樹植林の繰り返しは土壤養分の取奪を引き起こす可能性が高く¹⁾、しかもこうした商業植林の多くが、熱帯地域に固有の貧栄養土壌であるアクリソルやフェラルソルの分布する地域を主な対象地として実施される。その結果、こうした早生樹による短伐期施業の繰り返しは土壤養分プールの消耗・枯渇をもたらし、持続可能な木材生産の障害となる恐れが指摘されている²⁾。

このため早生樹植林における合理的かつ持続的な養分の利用・管理をどのように実現するかは早生樹植林の持続可能な経営の成否にかかわる重要課題であり、そのための技術・指針の提示が急務となっている。

一般に樹木の養分の要求・利用特性は樹種毎に異なり、熱帯早生樹もその例外ではない^{3,4,5)}。例えば

インドネシアのカリマンタン地域でユーカリプタス・デグラプタとアカシア・マンギウム、植林地を比較した例では、材へのK蓄積量が前者で後者に比べ顕著に大きいことが明らかになっており²⁾、樹種による利用特性の違いを反映したものであると考えられる。したがって、こうした早生樹植林に伴う土壤養分消耗の程度や様式もまた樹種毎に異なることが予想される。

東南アジア地域では、南米などに比べて早生樹植林の歴史が相対的に浅いため、その土壤養分環境への影響に関する情報は未だ限られているのが現状である^{1,6)}。本報告では、熱帯湿潤アジアの代表的な早生樹種であるアカシア・マンギウム (*Acacia mangium*) と、近年その造林面積が拡大しつつあるユーカリプタス・ペリタ (*Eucalyptus pellita*) の2樹種について土壤養分環境への影響を比較すると同時に、その原因についても考察した。

土壤のサンプリング

調査は2007年から2009年にかけてインドネシア共和国南スマトラ州で19万ヘクタールに及ぶアカシア・マンギウム植林地を経営するP.T. Musi Hutan Persada社の異なる3地域(3°32' S, 104°6' E, 3°42' S, 104°0' E, 3°47' S, 104°55' E)において実施した。海拔は60mから200mで、地形は緩やかな波状地形であり、1991年から2002年までの年間降水量、年平均気温はそれぞれ2750mm, 27.3°Cで11月か

Takuya Sasaki, Seiichi Ohta, Yukiko Sawa, Agus Wichaksono : The effect of *Acacia mangium* and *Eucalyptus pellita* plantation on soil nutrient condition in South sumatra, Indonesia

*¹元・京都大学大学院農学研究科, *²Musi Hutan Persada社

ら4月が多雨期, 6月から9月までが少雨期である¹⁾。また地質は砂岩, 泥岩, 粘土岩の互層から成る第三紀の堆積岩であり, 主要な土壌は Veti-hyperdystric Acrisol に分類された¹⁾。

異なる3地域においてそれぞれ, アカシア・マンギウム (アカシア) とユーカリ・プタスペリータ (ユーカリ) の3年生林分を試験地として研究を実施した。それぞれの試験林分は約1ヘクタールである。3対象地共前植生はアカシア植林地であり, いずれも7年生の時点で2007年2-7月の間に伐採し, 2008年2月に各約1ヘクタールのアカシアとユーカリ植林地を造成した。3地域のアカシア林分とユーカリ林分は, 土壌条件が極力同じになるよう互いに隣接して造成した。植栽後3年後のアカシアとユーカリの3地域における樹高及び胸高直径の平均はそれぞれ, アカシアが樹高: 12.6 m, 胸高直径: 14.1 cm であり, ユーカリが樹高: 13.0 m, 胸高直径: 12.7 cm であった。

土壌サンプリングは植栽木の成長に伴う土壌の時系列的変化を評価するための時系列サンプリングと, 1地点に絞ることでその変化をより詳細に評価することを目的とした詳細サンプリングから構成されている。また樹種間差が生まれる原因を考察するために, リターフォールを採取し, 樹種からの養分還元量を評価した。

時系列サンプリング

各3地域の両林分で2007年9月から2010年12月まで3ヶ月毎に0~5 cmの土壌サンプリングを行い, pHの時系列変化を樹種間で比較した。それぞれの林分から土壌円筒を用いて6繰り返しで採取したものを1つにコンポジットし, 蒸留水と1:2.5の割合で混合したのから土壌pH (H₂O) を測定した。

詳細サンプリング

3地域のうち1地域を選び, ユーカリ林分, アカシア林分でより詳細な土壌サンプリングを行い, 土壌断面内でのpHや養分元素の深さ方向の分布を比較・解析した。サンプリングは植栽から約2年半後の2009年の9月に行い, 深度20 cmまで深度毎に

サンプリングを行った。採取深度は0~1 cm, 1~2 cm, 2~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm, 15~20 cmである (n=8)。また各林分から一定面積のリター層を採取した (n=11)。サンプル採取後はそれぞれの風乾重量を測定した後, 一部を絶乾重測定用, 一部を養分分析用のサンプルとした。

リターフォールのモニタリング

2009年6月から2010年6月まで, 詳細サンプリングと同じ1地域の両樹種において10カ所のリタートラップ (0.8 m×0.8 m) を設置しリターフォールを採取した。リターフォールは月毎にまとめ, それぞれの絶乾重量を測定した後, 月毎にコンポジットしたものを養分分析に用いた。

分析元素

鉍質土層中の養分元素として, 交換性Ca, Mg, Kと, Pのうち植物が利用可能な形の指標として用いられるBray2-P (Bray No. 2法で定量したP濃度), 及び全Nについて評価した。また交換性Naと交換性Al, Hを合わせて測定し, 塩基飽和度の計算に用いた。またリター層, リターフォール中の養分元素として全Ca, Mg, K, N, Pについて評価した。

土壌pHへの影響

図1に3年3か月にわたる時系列サンプリングによる土壌pH変化を3地域の平均値で示した。鉍質土層0-5 cmのpHは, 2008年の植栽時には両林分でほとんど差が認められなかったが, その後植栽木の生長と共に比較的早い時期からアカシアよりもユーカリで一貫して低いpHを示し, 時間の経過と共にその差はやや拡大する傾向が認められた。最終時点において, ユーカリ表層土壌はアカシアよりも約0.3低かった。また表層土壌のpHは季節変動を示し, 両樹種とも一般に少雨季に高く多雨期に低下する傾向を示した。立地や季節変動などが同様の条件下でこのようなpHの違いが現れたことは, 植栽樹種によって土壌への影響が明らかに異なることを意味し, また多雨少雨といった季節的な変動を経て

もその違いが一貫していることを示している。

以上の時系列サンプリングで示された樹種による影響を次表層土壤まで拡大して明らかにするため

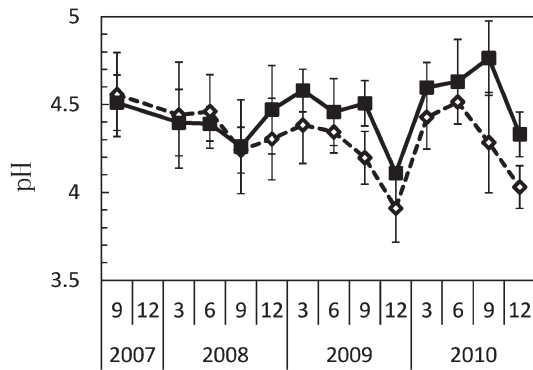


図1 アカシア植林地 (■) 及びユーカリ植林地 (◇) の土壤0-5cmにおけるpHの時系列変化

に、3地域のうちの1カ所を選定して行った詳細サンプリングによる結果を図2に示した。土壤pHは全深度においてアカシア林よりユーカリ林で有意に低く、時系列サンプリングで認められたユーカリ林土壤におけるより強い土壤酸性化は表層のみならず次表層においても同様に進行していることが明らかとなった。また両樹種のpHの違いは表層では約0.5程度であったが、深さと共にその差は縮小傾向を示し20cm深では約0.4であった。表層付近でより強い影響が出たことから、こうした樹種の違いは土壤に養分を供給する表層付近のリター層や表層付近に集中的に分布する根と関係している可能性が示唆される。一般にアカシア類などの窒素固定樹種ではその窒素固定、硝化の過程によって土壤酸性化を引き起こすことが知られており⁶⁾、ハワイのユーカリプタス・サリグナとマメ科アルビジア・ファルカ

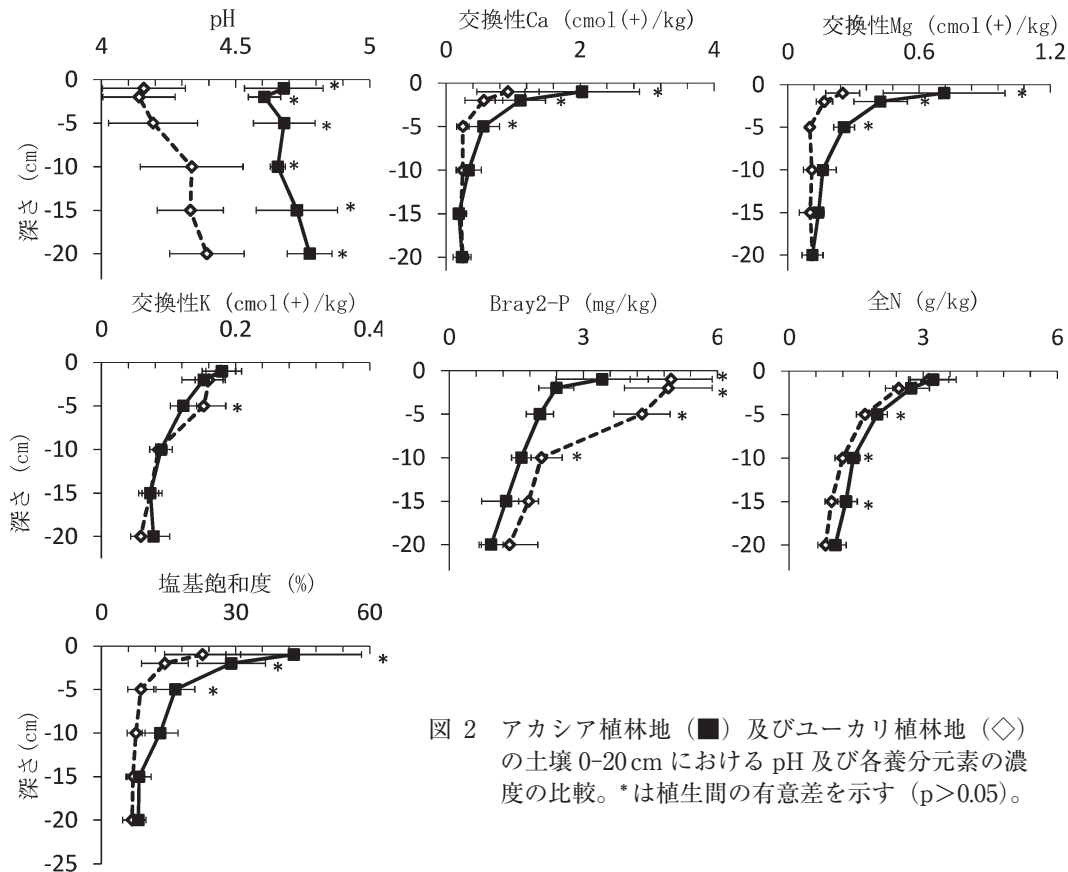


図2 アカシア植林地 (■) 及びユーカリ植林地 (◇) の土壤0-20cmにおけるpH及び各養分元素の濃度の比較。*は植生間の有意差を示す (p>0.05)。

タリアを比較した研究では、植栽8年目のユーカリで土壌0-15cmのpHが植栽初期の5.9から5.0まで減少したのに対し、アルビジア林では5.9から4.6まで減少したことが報告されている⁷⁾。しかしながら本研究の結果では、それとは逆にユーカリ植林地でより強い土壌酸性化が進んでおり、早生樹植栽による土壌酸性化の様相は一概にマメ科-非マメ科の違いによって決まるものではなく、他のメカニズムが働いている可能性を示唆している。

土壌養分元素への影響

以上のように土壌pHの影響が樹種によって異なるが、このことはその他の土壌理化学性への影響もまた樹種によって異なること、また土壌pHの違いは樹種の養分利用特性の違いを反映している可能性を示唆している。そこで詳細サンプリングで得た土壌深度ごとのサンプルを用いて代表的な養分元素についてその濃度を評価し、図2に示した。交換性Ca、Mg濃度は深さ5cmまでユーカリ林でアカシア林より有意に低い一方で、5cm以深では同程度の濃度に近づいていくことから、植栽樹種の違いが表層付近の両イオン濃度差の違いをもたらしたと推定される。また塩基飽和度でもCa、Mgの違いを反映して深さ5cmまでユーカリ林でアカシア林より有意に低かった。交換性Kでは樹種間で明瞭な違いは見られなかった。

一般に塩基交換容量に占める塩基イオン量の%で示される塩基飽和度が低下すると土壌pHも低下することが知られている⁸⁾。例えば同じく南スマトラでの先行研究によれば、チガヤ平原からアカシア植林地への改変は表層土壌中の交換性Ca、Mg濃度を減少させ、それにともない土壌pHの低下をもたらすことが明らかになっている¹⁾。従って、本研究事例においても何らかの原因でユーカリ林表層土壌の交換性Ca、交換性Mgの相対的に減少したことが、pH低下の一因であると推定された。

一方、必須多量養分元素の1つであるPを植物に利用可能なBray2-P濃度で比較すると、交換性CaやMgとは逆にアカシア林でユーカリ林より低

い値を示した。また、その樹種間差は0-5cmで最も大きく深さと共に縮小傾向を示し、樹種の違いがその原因であること推定された。また土壌の全窒素濃度は窒素固定能を持つアカシア林でより高い傾向が認められたものの、その差はわずかであった。以上の結果は、植栽後わずか3年にして樹種の違いが土壌養分環境に差異をもたらすこと、またその差異は樹木細根による養分吸収やリター供給を經由した物質循環の主要な場である表層土壌の、特に交換性CaとMgならびにBray2-Pに顕著に現れることが明らかとなった。

植林樹種の土壌-樹体系の養分存在量

樹種の違いが土壌養分に上記のような違いをもたらした原因についてさらに考察するため、樹種間で特に違いの大きかったCa、Mg及びPの3元素を対象として、樹体からのリターフォールを經由した養分還元量、およびリター層中の養分蓄積量について検討を行った。図3ではそれらとともに鉍質土層0-20cmまでの蓄積量(kg/ha)を合わせて図示している。

図3にCa、MgならびにPのリターフォール経由の年間供給量、リター層中ならびに鉍質土層(0-20cm)中の現存量を示した。ただしリターフォールとリター層については各元素の全量で、鉍質土層については交換性Ca、MgならびにBray2-P量で示した。リターフォール経由の供給量ならびにリター層中の存在量は全Ca、全Mg、全P共に、一貫してユーカリよりもアカシアが多かった(図4)。リターフォールによる供給量とリター層中の存在量の間でみられる樹種間の類似性は、リター層中の養分量はその起源であるリターフォール供給量を強く反映していることを示していた。鉍質土層の交換性Ca、Mgは上記の濃度差を反映してアカシアで、一方でBray2-Pはリター層の濃度差とは逆に、ユーカリ林で存在量が大きかった。

以上の結果から、Ca、Mg存在量に違いが現れた原因としては、以下に述べる2つの仮説を提示することができる。1) ユーカリ林でアカシア林に比べ、

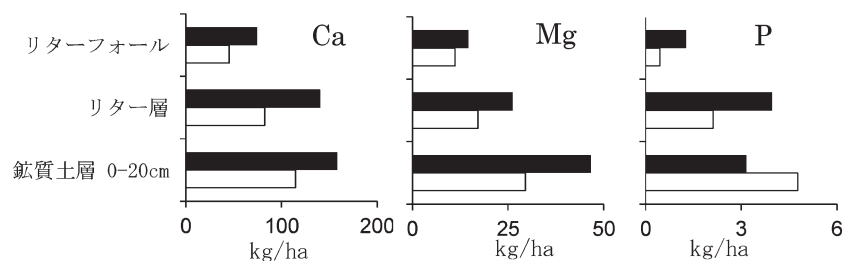


図3 アカシア林 (■) ユーカリ林 (□) の1年間のリターフォールによる養分還元量とリター層中及び鉍質土層中の養分蓄積量の比較。鉍質土層中のCa, Mgについては交換性Ca, Mgの量を, またPについてはBray2-Pの量を示している。

土壌交換性Ca, Mgの生長に伴う樹体への吸収が大きく, 相対的に土壌の蓄積量が小さくなった。2) ユーカリ林でアカシア林に比べ, 根系の発達する土壌より下層への溶脱が卓越したことにより, 土壌の蓄積量が小さくなった。

1の仮説が正しいとすれば, ユーカリ林において辺材, 心材または樹皮といった支持組織への蓄積が相対的に大きいこととなる。リターフォール経由の還元量がユーカリ林で低いこともこれを反映しているかもしれない。樹体バイオマスに占める辺材, 心材, 樹皮のバイオマス量は多く, こうした部位の濃度差は土壌養分からの最終的な吸収量の違いに大きく寄与する可能性がある。特にユーカリ類では樹皮へのカルシウム濃度の高さが指摘されており⁹⁾, 樹皮への蓄積量の違いが大きな原因であるかもしれない。しかしながらこうした仮説は前提として樹体—土壌系内で見つかった養分存在量の総和が両樹種で等しい, すなわちその植栽の過程で土壌のより下層へ溶脱される養分量が両林分で等しいという仮定が必要である。

一方仮説2が正しいければ, 樹体—土壌系全体で見つかった養分蓄積量がユーカリ林でアカシア林より小さいことを意味する。リターフォール, リター層における養分蓄積量の小ささもユーカリ林の樹体—土壌系全体において循環する養分量の相対的小さを反映した結果であるかもしれない。こうした下層への溶脱の原因の一つとして, 降雨を通じてリター層から抽出される可溶性物質の性質の違いが考えられる。

ユーカリのリター層からの溶存有機物はアカシアに比べ, フェノール類, カルボキシル類などを多く含んでいることが報告されている¹⁰⁾。ポリフェノールやフェノールカルボン酸は土壌を流下する過程で土壌中のカチオンの洗脱を促進する特徴がある。こうしたリター層からの抽出物の性質の違いが土壌下層への溶脱量, および土壌—樹体系の蓄積量に違いを与えた可能性がある。

Pについては, アカシア林でユーカリ林より鉍質土層のBray2-Pが低く, 一方リターフォール, リター層中の存在量はアカシア林で低かった。先行研究から窒素固定樹種では他樹種に比べPを吸収するための酵素であるフォスファターゼ活性が高いことが分かっている¹¹⁾。また本研究と同地域の土壌0-2cmにおいても, アカシア林でユーカリ林よりフォスファターゼ活性が高いという報告がある¹²⁾。本研究においてもアカシアのP利用性の高さによって, ユーカリ林に比べ樹体への吸収が大きくなり, Bray2-P存在量が相対的に低くなった可能性がある。また吸収量の差は, 葉のP濃度の樹種間差にも反映され, リターフォール及びリター層中の蓄積量の違いを生み出した可能性がある。

持続的な森林経営と今後の課題

本研究によって植栽2年半の早い段階から, アカシア林とユーカリ林で土壌養分への影響が表れることが明らかになった。本研究ではバイオマス中の養分存在量を評価していないため, 最終的に材として持

ち出される収奪量を算定できないが、仮に下方への溶脱量に樹種間で差がないとすれば、伐採時、アカシア林で Bray2-P の残存量が、一方ユーカリ林で交換性 Ca, Mg の鉍質土層の残存量が小さいことが推察される。今回、限定された土壌地帯において研究を実施したため、ここで得られた土壌影響に関する結果を必ずしも一般化することはできないが、両樹種の養分利用特性そのものは恐らく普遍的であると考えられる。そのため、養分面から見て持続的な早生樹植林を実現するための施肥を考える際、アカシア植林地では特に土壌 P のレベルに、一方ユーカリ植林地では Ca と Mg のレベルにそれぞれ留意する必要があると言えよう。なお、本報告では評価を行わなかった樹体中への養分蓄積量ならびに収穫時に持ち出される養分量の試算については現地での伐倒調査を行い現在解析を進めているところである。

〔引用文献〕 1) 山下尚之ほか (2011) 海外の植林と林業 80 号, 17-22. 2) J Mackensen *et al.* (2000) *Forest Ecology and Management* : 131, 239-253. 3) John Turner *et al.* (2008) *Forest and Management* : 255, 1701-1712. 4) Dan Binkley *et al.* (1998) *Forest ecology and Management* : 112, 79-85. 5) E.B. Hardiyanto *et al.* (2004) *Site management and Productivity in Tropical Plantation Forests* : 93-108. 6) Raven *et al.* (1990) *New Phytol* : 114, 369-389. 7) C. Rhoades. (1996) *Forest Ecology and Management* : 80, 7-56. 8) Maynard Beery *et al.* (1971) *The Ohio Journal of Science* 71 (1) : 43-55. 9) P Hopmans *et al.* (1993) *Forest Ecology and Management* 59, 29-51. 10) 中村 誠 (2007) 熱帯早生樹のリター層を起源とする溶存有機物が土壌有機物に与える影響について (修士論文) 11) Benjamin Z. Houlton *et al.* (2008) *Nature* : 454, 327-239. 12) 塚本志緒 (2011) *Acacia mangium* と *Eucalyptus peltita* 植林地の堆積リター層・表層土壌におけるリンの可給性と酸性フォスファターゼ活性 (修士論文)