

早生樹産業植林のための生育環境モニタリング

鳥山淳平・金子真司

1. はじめに

短期間に多量のバイオマスの収穫が可能な早生樹は、1960年代から熱帯各地で植林され、90年代に大幅に拡大した¹⁾。Cossalterら¹⁾によると早生樹植林とは「強度に管理された商業植林で、あるブロックに単一の樹種が植栽され、高い成長速度（年平均成長速度 $15\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ 以上）で工業用の丸太材が生産され、そして植栽から20年以内に収穫される」ものであり（図1）、2000年時点で全世界に1000万ha存在し、年間約100万haのペースで増加しているとされる。

この早生樹の産業植林の広がりによって、天然林を主体としてきた熱帯の樹木の資源利用は大きく変化しつつある。早生樹産業植林は高い生産力を背景に木材需要に応えることで、貴重な熱帯林の資源を利用せずに保全することに貢献する。その反面、短期間に伐採を繰り返すことから、土壌中に保持される窒素やミネラル等の養分は樹木に急速に吸い上げられ、植林地の外へ持ち出されることになる。さらに、高い頻度で作業機械を利用する場合、土壌の表層部分の硬化とその後の土壌侵食の危険性を高め、土壌侵食もまた土壌の表層に保持された養分を植林地外に押し流してしまう。このため、早生樹産業植林では持続的な木材生産のための地力を維持できるかどうか課題となる。

早生樹産業植林の造成が急速に進められたインドネシアでは2000年頃から、早生樹植林地の管理の

ための基準・指標（Criteria and Indicators）作りが行われてきた²⁾。図2に示すように、早生樹植林地の基準と指標は、植林地の管理だけでなく、環境負荷の低減、人材育成と安全管理を含む幅広いものである。しかしながら、インドネシアの基準・指標の中で植林地の地力の管理の位置づけは明確でない。この背景として、基準・指標とセットとなる検証（Verifiers）が容易でないこと、またそれをバックアップする手法開発が進んでいないことが考えられる。地力の管理をバックアップする手法とは、施業ローテーションの進行に伴う土壌中の養分量の変化を科学的に監視し、地力低下のサインを見つける手法、すなわち生育環境のモニタリングである。生育環境モニタリングの結果は、施肥（どの元素を、どれだけ、いつ投入するのか？）や収穫（伐期を延ばすべきか？収穫残渣を林地に残すか？）の工程を決定する際の科学的根拠となる。また基準・指標そのものがモニタリングの結果に基づき作成、改訂される性質があるため²⁾、まずは生育環境モニタリングを試験的に設計、運用することで、基準・指標の整備も進むだろう。以上の観点から本稿では、今後も拡大が予想される早生樹植林地において生育環境モニタリングを適正に行うために、実行可能性のある手法の確立にむけた課題と提案を述べてみたい。

2. モニタリングの対象は何か

生育環境モニタリングを行う際の、最も重要なポイントはモニタリングの設計である。これは研究者



図1 植栽後6年で収穫されるアカシアマンギウム林
写真は4年目の林内の様子。インドネシア・南スマトラ州。写真提供、中山裕貴氏。

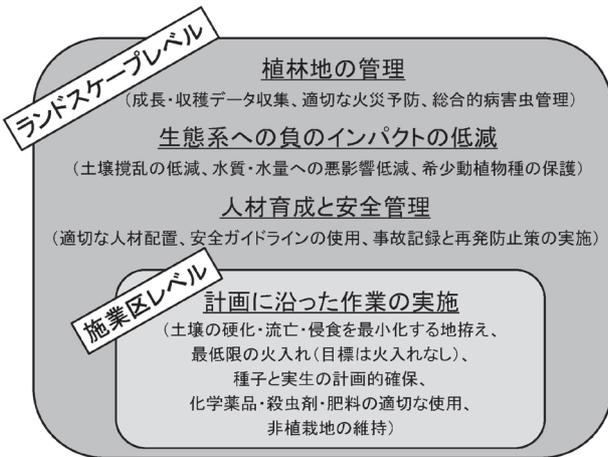


図2 早生樹産業植林の基準・指標
藤間²⁾より抜粋して作成。原典は Poulsen ら⁹⁾。
下線項目は筆者がグループ化した基準、括弧内項目は個別の指標。

が行うフィールド研究についても言えることである。長らく学術雑誌 Forest Ecology and Management の編集長を務めてきた D. Binkley は、その豊富な査読経験から、研究者が森林試験区を設定するときに注意すべき3つのポイントとして、調査対象を明確にする、真の反復と副標本をきちんと区別する、連続変数を定量的に扱う(カテゴリ化しない)

ことを述べている³⁾。この3つのうちモニタリングの設計では、特に調査対象の明確化が求められる。広域のエリアと複数のクローンを含む設計では、集計結果の不確実性(後述)が高くなり、サンプリングコストが増大する。その為、自身のモニタリング対象が1haのブロックに植栽されているユーカリの単一クローンなのか、それとも1000km²の事業地のいろいろなところに植栽された林齢や品種の異なるアカシアマンギウム林なのか、そしてモニタリングデザインはそれらを十分にカバーできているか、よく検討する必要がある。

地力の調査項目の選択も重要である。植林地の土壌中には窒素やリンに代表される主要な栄養素から、鉄やマンガンのように微量の栄養素まで多くの種類の元素が存在し、樹木の生育を支えている。このため土壌養分の調査項目を絞りすぎると、他の重要な因子を見逃す可能性が高まる。その一方、むやみに項目を増やすと分析コストが増大するというジレンマがある。この問題の解決策として、より低コストで迅速に把握できる土壌 pH 等の項目を全ての調査地点に組み込み、その中からランダムもしくはシステムティックに選んだ地点で、より詳細な調査を行う「入れ子」の設計が有効である。ちなみに土壌 pH の低下は土壌中のミネラル(カルシウム、マグネシウム、カリウムなど)の減少の目安となる⁴⁾、樹木の成長速度と合わせてモニタリングを続けることで、事業地ごとに異なる地力低下の基準値を土壌 pH から得られる可能性がある。

3. 不確実性を減らすサンプリング

モニタリングデザインの概要が決まると、次には1回のモニタリングで何サンプルを調査したらよいか、ということを考える必要がある。観測された値が統計的に確からしいと保証するために、調査者が「最大でもこの程度の誤差に留めておきたい」とサンプリングの前に設定する誤差のことを許容誤差という。一般に許容誤差 E とサンプル数 n の関係は(1)式で示される⁵⁾。

$$E = (t \cdot s) / \sqrt{n} \quad (1)$$

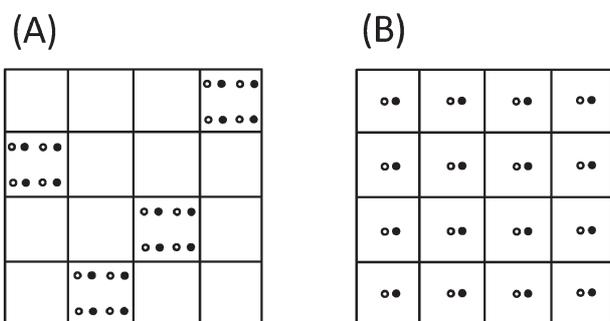


図3 サンプルングデザインの比較
 (A) 4つのブロックを抽出し、各ブロックで4反復した場合；(B) すべてのブロックで1回ずつ行った場合。白丸と黒丸はそれぞれ1回目と2回目の調査地点を示す。(A)と(B)の分析点数は同じだが、(B)は調査地全体をカバーする点で優れている。(B)は1回の調査で攪乱するブロック内の面積が小さいので、3,4回目以降のモニタリングにも利用しやすい。

tはt分布の危険率が5%で自由度がn-1のときの値、sは標準偏差である。植林地における地力の変化を見逃さないためには、許容誤差を低く設定する必要がある、それに応じてサンプル数を決定する。このとき、不確実性の増大(式(1)におけるsの上昇)は、サンプルングコストを上昇させるだけでなく、真の傾向を覆い隠し、モニタリングの労力を無駄にする。不確実性の発生要因は多様である。例として土壌特性の空間的なばらつきが挙げられる。土壌のpH、炭素やミネラルの蓄積量は、同じ林地であっても採取地点が離れるほど値がばらつく為、時系列の変化を評価する際の不確実性を増大させる。この不確実性を減らす手段としてはGPSロガーによる採取地点の記録が有効である。最近のGPSロガーを用いれば、前回の土壌調査地点が埋め戻された状態であっても、数年後に近傍(例えば東側に3m移動と決めておく)の地点を再調査できる。この範囲であれば空間的なばらつきはかなり抑えられる為、統計的に「対応のある」サンプルングの為の検定手法を利用することで、時系列の変化の検出力を上げることができる。また1回目と2回目のモニタリングで担当者が交代した場合でも引き継

ぎが容易となる。

調査時期のずれに伴う不確実性の発生を回避する努力も必要である。1回目と2回目の施業ローテーションで比較するのであれば、同じ林齢の、同じ季節(乾季のはじめなど)にサンプルングを行うことが望ましい。また広域をカバーするモニタリングの場合、同じ林地のブロック内で反復を増やすより、ブロックの数を増やすほうがよいとされる³⁾(図3)。

これはBinkleyの指摘する真の反復と副標本の区別をモニタリングの設計に反映したものである。調査中の移動時間が増えるため、サンプルングコストが上がる可能性があるが、調査地全体をカバーすることで、真の傾向を検出しやすくなるメリットは大きい。

4. モニタリングの落とし穴

これまでの説明は、モニタリングに共通の話題であった。本節では、土壌に限ったテーマであるが「細土容積重」の計測の重要性について説明したい。細土容積重とは石礫や植物根を除いた粒径2mm以下の土壌(細土)の容積あたりの重量(すなわち密度)である。早生樹産業植林地において、トラクターを用いた集材作業の繰り返しは、土壌の表層部分をぎゅっと締め固める(圧密という)。過度の圧密は、水分保持の為の土壌中のすきまを減少させ、実生の成長を阻害し生産力低下の一因となる⁶⁾。圧密の度合いを知るためには、土壌の詰まり具合をチェックすることが有効であり、細土容積重の計測もその手法の一つであるが、土壌養分のモニタリングの観点からも細土容積重を計測するメリットは大きい。一部の読者は海外の事業地において、土壌試料の分析を相手国の分析機関(政府機関、大学等)に委託した経験があるかもしれない。多くの分析機関は、送られてきた土壌試料を室内で乾燥させ、孔径2mmのふるいに通した後、炭素、窒素、リン等の元素の「濃度」を定量してくれる。さらに専門知識のある読者は、施業ローテーションの進行に伴い変化する細土容積重を自ら計測し、以下の計算式によって土壌養分の蓄積量を計算することができるだろう。

土壤養分蓄積量(t/ha) = 土層の厚さ(cm)

× 養分濃度(%) × 細土容積重(g/cm³) (2)

例えば、深さ 0-10 cm で採取した土壤の養分濃度が 0.20% で、細土容積重が 1.3 g/cm³ の場合、土層内の養分蓄積量は 2.6 t/ha と計算される。ここで仮に、10 年後に同サイトの同深度でモニタリングを行い、養分濃度が 0.18% で細土容積重が 1.5 g/cm³ だったとしよう。土壤養分蓄積量は 2.7 t/ha となり、土壤養分は 0.01 t/ha/year で増加したと結論づけられる。この結論は「深さ 0-10 cm の範囲で起きた変化として」正しい。しかしながら、これでもなお、土壤養分の真の傾向を示しているとは言えない。なぜなら細土容積重が 1.3 から 1.5 g/cm³ に増えており、異なる質量（それぞれ 1300 t/ha と 1500 t/ha に相当）の土壤を比較しているからである。後者の 1500 t/ha の土壤のうち 200 t/ha 分は、(周辺からの土壤の流入がない場合) 1 回目の調査で深さ 10 cm より下層に存在していたものである。この種のモニタリングの落とし穴について、アグロフォレストリー研究で著名な P.K.R. Nair も近年同様の主張をしており⁷⁾、多様なバックグラウンドをもつ技術者が森林の生育環境のモニタリングを行うニーズが高まっているのかもしれない。ちなみに(2)式は全ての土壤中の元素に適用できるが、一般に「炭素濃度が時間的に増加している場合、同じ深さの細土容積重は減少する(逆も然り)」傾向がある為、両者を掛け合わせた土壤炭素蓄積量の時系列の変化は常に相殺される。今後炭素固定関連のプロジェクト(CDM 植林や REDD プラス)で土壤炭素蓄積量のモニタリングに取り組む者は、蓄積量の計算の際、自分の調査対象とする土壤の質量を揃えることを意識してほしい。

細土容積重の計測は高価な機器を必要としない(図 4)。しかし、金属円筒を土壤に打ち込み、抜き取る作業に慣れが必要であり、事前に試しておく必要がある。また(2)式は 1 地点の計算であるため、多地点の計算に拡張するには補正計算のテクニックが必要である⁸⁾。ここでは補正計算の詳細は割愛するが、筆者らがインドネシア・西ジャワ州のアカシ



図 4 土壤の細土容積重の測定のためのサンプリング
細土容積重は一定容積の金属円筒で土壤試料を採取し、その乾燥重量から求める。写真は土壤試料の端面を平らにカットしている様子。森林総合研究所のウェブサイトから転載。

アマンギウム林に適用した例では、4 年間という極めて短い期間の土壤炭素蓄積の変化を、補正計算によって効果的に検出することができた⁸⁾。このように細土容積重の計測を常に行い、調査対象とする土壤の質量を揃えることで、土壤の密度の変化による不確実性の発生を抑え、生育環境モニタリングを適正に行うことができるだろう。

5. おわりに

本稿では早生樹産業植林の地力管理に資するモニタリングデザインに関して、いくつか技術的な提案を行った。細土容積重についてはやや専門的であるが、差し当たってこのような課題があるということを知っていただけたらと思う。以上に述べたように、モニタリングの対象を明確化し、不確実性の発生を可能な限り抑えることで、早生樹産業植林の生育環境モニタリングは実行可能であると筆者は考えている。しかしながら、いい加減な調査を行うと誤った結論が導かれ、その結果土壤が劣化し、貴重な土壤資源を失うこともあり得るのである。今後、早生樹産業植林の現場に関わる企業や NGO の担当者、研究者らが各々モニタリングに取り組み、その

成果が早生樹産業植林の新たな管理指針の確立につながることを望む。本稿を執筆するにあたり森林総合研究所の藤間剛博士に多くの助言をいただいた。また京都大学大学院の森大喜博士，中山裕貴氏から資料提供を受けた。ここに深く感謝の意を表する。

〔参考文献〕 1) C. Cossalter and C. Pye-Smith (2003) Fast-wood forestry : myths and realities. CIFOR. (日本語訳版 : www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BCossalter0501J0.pdf) 2) 藤間 剛 (2012) 早生樹産業植林の概要—規模と生産力の観点から—。早生樹-産業植林とその利用。海青社 7-34。 3) D. Binkley (2008) Three key points in the design of forest experiments. *Forest Ecology and Management* 255 : 2022-2023。 4) 山下尚之ら (2011) インドネシア南スマトラ州におけるアカシア・マンギウム—産業植林が土壤に及ぼす影響。

海外の森林と林業 80 : 17-22。 5) 溝上展也 (2012) 固定調査プロットの必要数と配置。REDD-plus Cookbook. REDD 研究開発センター 112-113。 6) 稲垣昌宏 (2012) 産業植林と環境。早生樹-産業植林とその利用。海青社 35-56。 7) P.K.R. Nair (2011) Methodological Challenges in Estimating Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*. Springer 3-16。 8) J. Toriyama *et al.* (2011) Comparison of depth- and mass-based approaches for estimating changes in forest soil carbon stocks : A case study in young plantations and secondary forests in West Java, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 262 : 1659-1667。 9) J. Poulsen and G. Applegate (2001) C&I for Sustainable Development of Industrial Tropical Tree Plantations. CIFOR.