

熱帯造林地におけるバイオマス生産の持続性*

川井 秀一**, ラギール ウドヨリーニ**

Sustainability on the Biomass Production in the Tropical Forest Plantation*

Shuichi Kawai** and Ragil Widyorini**

概要

炭素循環の観点から森林の蓄積（ストック）と原木伐採（フロー）について考察し、森林バイオマスの特徴を明らかにした。さらに、ケーススタディとして熱帯地域の大規模造林地における森林バイオマスのストックとフローを推定評価した。森林バイオマスの生産と環境維持の観点から蓄積を重視すると共に、木材利用の立場からは原木伐採が重要であり、これらの二つの持続性維持が図る点で、天然林とは異なる人工造林の有用性を示した。

1. 森林バイオマスの蓄積（ストック）と原木伐出（フロー）

森林の炭素蓄積機能は、大気中の二酸化炭素削減と原木生産の両面から重要である。天然林でもまた人工林でも、一般に、森林の蓄積量は極若齢の段階では緩やかであり、その後成長の旺盛な時期を経て、やがて成長が鈍化する、いわゆるS字型の成長曲線を描く。スギの場合のように適切な施業管理によって100年以上成長が持続する樹種もあるが、アカシアのような熱帯の植林木は一般に成長が極めて早いものの、10～20年で成熟して成長が停止するものが多い。このように地域、樹種、管理方法によって成長曲線の時間スパンは大きく異なるが、その基本的な形はあまり大きく変わらない。

天然林でも、また人工林の場合も同様に、成熟段階において炭素蓄積（ストック）が最大となるが、この段階では成長による炭素吸収量と枯死・分解による炭素排出量とがバランスし、炭素蓄積の増分はゼロになる。人工造林（の多くは経済林であるが）において成長が鈍化する段階で伐採・再植林をする場合、炭素蓄積は最大にはならない反面、比較的大きな炭素の蓄積増分を期待することができる。生物多様性の維持機能を重視する保存林の場合には炭素蓄積量が大事であり、一方、木材生産機能を重視する経済林（生産林）では蓄積増分が重要である。後者の場合、増分に見合う原木の伐出（フロー）をして、これを最大限有効に活用する加工利用技術を開発し、生産と利用の持続性を確保することになる。そのためには年々の炭素蓄積量と蓄積増分、伐出の動的な解析把握が必要である。単位面積当たりの森林バイオマスの蓄積、増分、エネルギー投入量などを正確に把握することが基本となる。

樹木に蓄積されている炭素量は、樹木の体積（材積）から算出される。用材利用の場合には、材積は幹の材積（幹材積）で表すほうが実用的である。一方、地球温暖化抑制など大気中の二酸化炭素吸収源としての役割に関わる場合は、蓄積炭素量は幹材積の他に枝葉、根の要素を考慮し、以下のように算出される。すなわち、①根の量（地下部・地上部比）②枝葉の量（拡大係数）、③材積当たりの重量

*2011年9月16日受理

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所循環材料創生分野

E-mail: skawai@rish.kyoto-u.ac.jp

(容積密度、樹種によって異なるが、一般に 0.5g/cm^3)、および④重量に占める炭素量の割合(樹木重量中に炭素が占める割合は約 0.5)。①および②についてアカシア立木の部位別の重量比調査をみると、根、幹、枝、葉についてそれぞれおよそ 12、65 (内、樹皮 10%)、15、8% となっている。したがって、次の式により炭素量は求められる。

$$\text{炭素量} = (\text{幹材積}) \times (1 + (\text{地下部・地上部比})) \times (\text{拡大係数}) \times (\text{容積密度}) \times 0.5$$

炭素量を二酸化炭素の重量として算出するには、上式に $44 \div 12 (\div 3.67)$ を乗じることにより得られる。

2. 熱帯造林地におけるバイオマスの推定と評価¹⁾

インドネシアにおいては大規模産業造林が 1990 年代以降に本格化し、2006 年にはスマトラ、カリマンタンを中心に 280 万 ha に及ぶ造林がなされている。造林木の多くはアカシアやファルカタなどの早生樹種である。インドネシア南スマトラ州丘陵地において無秩序な開発や過伐によって荒地化し、草地となった地域にムシ・フタン・ペルサダ社 (PT Musi Hutan Persada, MHP 社) が 1990 年よりアカシヤマンギウムの産業造林を開始している (図 1)。



図 1 : 南スマトラ州のアカシア大規模植林 (MHP 社)

30 万 ha のコンセッション面積のうち、植林面積は 12 万 ha に及んでいる。MHP 社では、精英樹からの種の収穫、苗床への播種、ポットへの移植、林地の地拵え、植栽、下草刈り、伐採まで一連の施業・管理によって年間 240 万 m^3 の紙パルプ用チップを生産している。伐採に際して直径 8 cm 未満の末梢、枝葉、根は林地に残し、樹皮付きの幹材を搬出している。6 年～8 年の短伐期林業を実施し、いまでは第 3 世代の造林地となっている。

MHP 社造林地内のスバンジリジ地区を調査フィールドとして抽出し、森林バイオマス生産について調査測定し、その持続性評価を試みたケーススタディを紹介したい²⁾。使用したデータは 2000 年～2005 年に植栽された第 2 世代、1 年生から 6 年生までの樹木のバイオマス生産を含むインベントリ (2001 年～2006 年、6 年生を主体に場合により 8 年生を伐採) であり、その蓄積量 (ストック) と伐出量 (フロー) について時系列解析を実施した。すなわち、スバンジリジ地区 9,300 ha 内にランダムに設定された 0.05 ha のパーマネントサンプルプロット (PSP) のうち 51 プロットを調査対象

とした。植栽密度は 1,100 本/ha であり、植林初期段階での下草刈りのほかは、除伐・間伐等の施業は施されていない。インベントリデータは各 PSP にナンバリングされた 60 本の毎木調査を毎年実施して得られた胸高直径、樹高のデータからなり、これを元に平均年生長量を算出し、さらに単位面積当たりの幹材積ならびにバイオマス生産量を推定・評価した。

胸高直径と樹高は樹木の生長量に直接関係するので樹齢と正の相関を示す。伐期となる 6 年生の胸高直径は 16.0～20.6 cm、樹高は 16.7～22.1 m に達する。各 PSP の各年毎の幹材積プロットを基に算出される単位 ha 当たりの平均年生長量は、図 2 に示されるように、3 年生の立木で最大を示し、その後減少に向かう。5 年生立木の年生長量は $48.6 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ であり、5 年間の年平均成長量は $36.8 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ に達する。このような年成長を示すので幹材積は樹齢に対して S 字型曲線を示し、およそ 8～10 年で成長が止まって成熟林となる。5 年生アカシア林の幹材積は約 $188 \text{ m}^3/\text{ha}$ と見積もられる。アカシア材の容積密度は $0.5 \text{ Mg}/\text{m}^3$ 、したがってその幹材重量は $94 \text{ Mg}/\text{ha}$ である。各年の樹齢毎の植林面積から調査林地全体の材積を見積もることができるが、この値は植栽と伐採が伴うので年毎に変動し、その動態を把握することが重要になる。

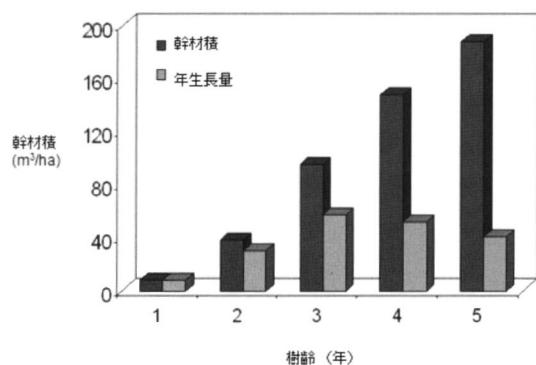


図 2：アカシマンギウム (AM) の成長量

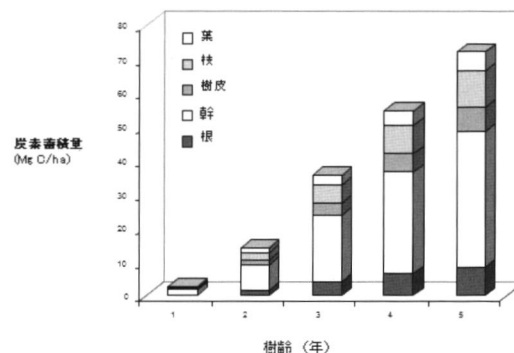


図 3：AM のバイオマス生産量

さらに、調査林区の立木バイオマス蓄積には、枝葉幹根の比に関するアカシア立木の文献を参考に、根、幹、枝、葉についてそれぞれ 12、65（内、樹皮 10%）、15、8% として炭素量換算で算出すると³⁾、図 3 に示されるように、5 年生のアカシア林のバイオマス蓄積量は炭素換算で $72 \text{ Mg C}/\text{ha}$ と算出される。したがって、二酸化炭素換算で $264 \text{ Mg-CO}_2/\text{ha}$ となる。一方、熱帯天然林（原生林）のバイオマス蓄積量は $254\sim390 \text{ Mg C}/\text{ha}$ と評価されている⁴⁾。このうち大きい数値は土壌中の蓄積炭素を含み、とくに泥炭湿地林ではこの値が大きくなっているものと推察される。天然林の平均蓄積量を概略 $300 \text{ MgC}/\text{ha}$ とすると、5 年生アカシア林の蓄積はその 1/4 程度である。他方、アラン・アラン (*Imperata cylindrica*) など草地や荒廃地のそれは $1.6\sim20 \text{ Mg C}/\text{ha}$ と見積もられているので、その 10 倍近い蓄積をもっていると推定される。世界の森林 39 億 ha の地上部木質バイオマスは 4,220 億トンと推計されているので、森林 1 ha 当たりの炭素蓄積は平均 60 トン ($\text{Mg C}/\text{ha}$) と見積もられる。植え付けから 5 年を経過したアカシア林の蓄積はこれを約 20% 上回る程度の炭素蓄積と評価される。

一方、産業造林であるアカシア林の場合、上記のような炭素蓄積評価に加えて資源として利用している立木伐出量（フロー）を合わせて評価すべきである。産業造林における森林バイオマス「持続」の基本は植林を基盤とする生産を上回る伐採・消費を抑えて蓄積（ストック）を維持し、その増分のみを安定的に利用することが持続性確保の必須条件である。例えば、MHP 社スパンジリジ地区におけるアカシア造林地の 2006 年時点（実植林面積 8,340 ha）での蓄積は幹材積換算で 83.2 万 m^3 で

あり、その蓄積平均は $100.8 \text{ m}^3/\text{ha}$ と推定される。したがって、この造林地が蓄える全バイオマスの炭素換算蓄積量は $45.9 \text{ Mg C}/\text{ha}$ と計算される。他方、同年の伐採面積は $1,549 \text{ ha}$ 、原木伐出量は 19.1 万 m^3 である。ヘクタール当たりの原木伐出量（幹材積）は $123.3 \text{ m}^3/\text{ha}$ ($30.8 \text{ MgC}/\text{ha}$) であり、残材として伐根と枝葉のほか、造材時の端材等の発生や幹径 8 cm 未満の末梢が林地に残されている。

6 年伐期とすれば、およそ $1/6$ ($9,300 \text{ ha}/6 = 1,550 \text{ ha}$) に相当する林地の伐採と植林により持続性確保が可能であり、伐採と植林により個別小林区のバイオマス蓄積に動きがあっても、ある程度の面積をもつ林地全体としてみれば、安定したバイオマスの蓄積ストックと共に、伐採フロー、すなわち原木生産を維持することが理想である。しかし、実際には原木の供給は需要の変動に影響されるほか、樹木生長量も年毎に変わるので、バイオマスの蓄積とその年間変動を長期的な視点で観測解析し、安定を図ることが必要になる。図4は天然林、荒廃地・草地および2006年時点のアカシア林のバイオマスストックとフローを比較して示したものである。森林バイオマスの生産と環境維持の観点から蓄積が重要である反面、木材利用の立場からは伐採が大切であり、これらの二つのストックとフローの調和を保ち、その持続性維持を図る点で人工造林は有用であるといえる。

このほかに熱帯早生樹の植林に見られる短伐期の産業造林では、土壌の劣化や栄養塩の循環なども長期的な視点からの観測が必要であり、世代間にわたる生産の持続性に関する評価検証も求められる。熱帯地域の産業造林の歴史は新しく、未だ不明の点も多い。パルプチップ材のほか、用材生産のための造林手法確立も急務となっている。森林バイオマスの生長量はもとより気温、降雨量の影響も受け、いわゆるエルニーニョ現象による少雨の影響は植え付け直後の樹木の成長に大きな影響を及ぼす可能性が高い。

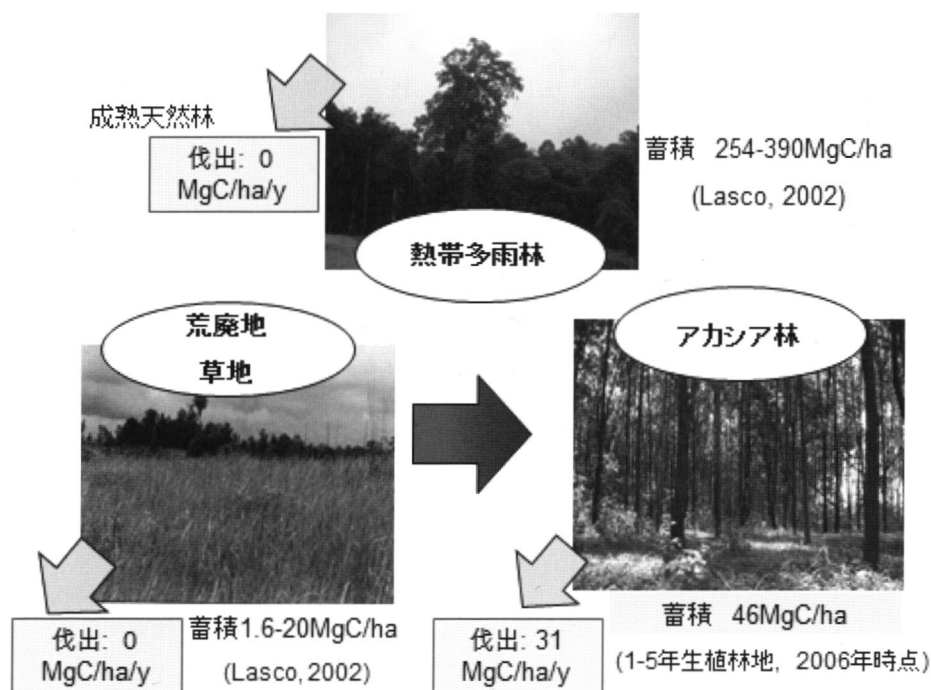


図4：天然林、アカシア林、草地のバイオマスストックとフロー

なお、林地全体の炭素循環については、落ち葉や枯れ枝などのリター量と共に土壌内の炭素の動きの検討が必要である。林地のリター量は樹齢の増加と共に増加し⁵⁾、これに伴い土壌有機物が増加する傾向が認められている。加えて、伐採収穫時には枝葉根、末梢等、相当量の残渣が林地に残されるが、裸地状態での表層土壌からの有機物の分解・消失は極めて激しく、その大半の有機物は短期間の

うちに大気圏へ還流するものと推定される。

このような生産の持続性に加え、生態環境の持続性を確保するには広域にわたる森林の機能に応じたゾーニング、すなわち生命圏生態系の維持保全機能を重視する保存林、緩衝ゾーンとしての 2 次林（保全林）、さらには人間圏の資源エネルギー供給機能を重視する持続循環型生産林を適切に配置し、人間活動と生存基盤としての環境との調和を図る技術の開発、制度の構築が課題となっている。人間圏との調和を図るためのバイオマス利用のあり方、地域コミュニティとの調和ある発展、社会林業との共存も産業造林の持続性確保のうえで重要な課題である。

謝辞

本論文の熱帯造林地におけるバイオマスの推定と評価に関するケーススタディの実施において、ムシ・フタン・ペルサダ社 (PT Musi Hutan Persada, MHP) の全面的な協力を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉原薫, 川井秀一, 田辺明生, 河野泰之 (共編著): 第 7 章 熱帯林生命圏の創出, 地球圏・生命圏・人間圏—持続的な生存基盤を求めて—, pp. 215-231, 京都大学学術出版会, 2010
- 2) Widyorini, R., Kawai, S., Subiyanto, B., Hardiyanto, E. B., Firmanti, A., Gunawan, R., Suryanti, T., and Wicaksono, A., Evaluation of tree growth and biomass production of *Acacia* plantation forest in tropical area, *Proceedings of the 92th RISH Symposium*, pp. 37-39, Cibinong, Indonesia, 23 February, 2008.
- 3) Sunarminto, B., Effect of litter non-productive biomass on supporting availability of soil nutrients, Technical Notes, 1(4), pp. 10, 2000, Research and Development Division, PT. Musi Hutan Persada.
- 4) Lasco, R. D., Forest carbon budgets in southeast asia following harvesting and land cover change, *Science in China*, **45**, 55-64, 2002.
- 5) Subarudi, D., Djaenudin, Erwidodo and Cacho, O., Growth and carbon sequestration potential of plantation forestry in Indonesia I. *Paraserianthes falcata* and *Acacia mangium*, Working paper CC08, ACIAR project ASEM 1999/093, 2003.