

CDM 植林実施に向けて

—インドネシアにおけるバイオマス推定の取り組み—

加 藤 剛

はじめに

インドネシア林業省研究開発庁 (FORDA) をカウンターパート機関として、2001年に始められた JICA プロジェクト「炭素固定森林経営現地実証調査」は、2006年1月6日をもって終了した。気候変動枠組条約締約国会議 (COP) の議論と同時進行で進めてきたプロジェクトであっただけに、プロジェクトのあり方や方向性については、様々な議論を呼ぶこともしばしばだった。特に、プロジェクト開始当初は森林経営に木炭をいかに組み込むかが大きな課題の一つであった。地拵え時に発生する残材を木炭化して、植栽時に混ぜて土中に閉じ込めてしまおうという計画である。従来地拵えでは残材の多くは焼却されるか、放置されるかである。それでは炭素を放出してしまうことになる。そのため、プロジェクト開始当初の目的は重要な意味を持っていた。また、木炭は同時に土壌改良材としての役割を果たすことにもなる。しかしながら、COPの議論が進む中でその目論見は残念ながら軌道修正しなければならなくなった。一方、吸収源よりも排出削減が重視される中、産業植林をベースにした CDM 植林プロジェクト (AR-CDM) の可能性を探ろうとすると、CDM の枠組みでは実施の困難さばかりが浮き彫りになった。そのような中、COP10 (2004年開催) で小規模 AR-CDM が認められたのは大きな変化の一つであった。

インドネシアにおいては、京都メカニズムに当初より積極的な関心が持たれ、京都議定書への批准が2004年7月に行われた。さらに同年12月に UNFCCC 事務局に正式に登録された。また、森林の定義も定められ、準備が着々と進展しているようである。ここに至るまでの動きについては、プロジェ

Tsuyoshi Kato : Approaches to Estimating Forest Biomass for Implementation of Feasible A/R-CDM Projects in Indonesia.

JICA インドネシア炭素固定森林経営現地実証調査プロジェクト専門家

クトリーダーであった安藤が作成した「インドネシアにおける AR-CDM プロジェクト実施マニュアル」にまとめられている。AR-CDM に関係する法律なども含め広範にわたる資料が集められており、インドネシア国外にはなかなか手に入らない、知りようがない重要な情報も網羅されている。プロジェクトのホームページからダウンロードできるようになっているので是非参考にしていきたい (<http://www.cffmp.org>)。

本稿では、プロジェクト活動を通して得られた知見、特に筆者が担当したバイオマスや炭素固定量の推定方法について紹介していきたい。なお、プロジェクトの概要についてはすでに本誌に紹介されているので併せて参照していただきたい(安藤, 2004)。また、京都議定書そのものについてはすでにいくつかの文献があるので、そちらをご覧になっていただければと思う(小林, 2004)。もちろん、インターネットでキーワードを検索していただければさらに多くの情報が得られるはずである。

注目すべき既存研究

はじめにインドネシアにおけるこれまでの貴重な研究や取り組みについて紹介したい。バイオマス推定のための相対成長式は、ボゴール農科大学(IPB)の Rizaldi 氏らが中心となってまとめたレポートが大いに参考になるだろう(IGES and NIES, 2001)。ちなみに、学生の卒業論文からの引用なども含まれていて、Rizaldi 氏本人が過日語っていたことだが、学生の卒業論文には精度が落ちるケースもあるそうである。利用には若干の注意が必要かもしれない。とはいえ、これだけのデータを多岐にわたって収集できるのは、現地の研究者にしかできないことであって、素直に敬意を表したい。小規模 AR-CDM を検討する場合、国際アグロフォレストリーセンター(WAC, 前 ICRAF)には貴重なデータが所有されている。特に、スマトラ島のジャンビ州やランブン州におけるアグロフォレストリーに関する研究は注目に値する(ICRAF, 1998)。当時、彼らがすでに AR-CDM を意識していたかどうかは定かでないが、アグロフォレストリーを普及させるために、アグロフォレストリーの機能を生物多様性の観点からだけでなく、炭素固定量からも言及したことは彼らの慧眼だったと言うべきだろうか。筆者は 1990 年代に彼らのすぐそばで調査を続けていたが、彼らの調査の重要性を当時はなかなか理解できないでいた。恥ずかしながら本プロジェクトに参加して初めて、彼らの仕事を理解したと言っていい。その他にも貴重な情報は多々ある。しかしながら、見落としがちな貴重な研究が

あるのでは是非紹介したい。AR-CDM の課題とすべき 5 つの炭素プール（地上部バイオマス，地下部バイオマス，リター，枯死材，土壌有機物）のうち，枯死材とリターはなかなか取り扱いの難しい炭素プールである。IPCC のグッドプラクティスガイダンス（IPCC, 2003）には，「収支が均衡状態であると見なし，基本的に枯死材とリターは推定しなくてもよい」との記載もあるが，例外もあるので注意が必要である。そこで，枯死材とリターの分解率のデータがあれば何かと便利であろう。二次林は米田（2000），泥炭湿地と熱帯ヒース林（ケランガス林）については Rahajoe ら（2003）を参照とするとよいだろう。植林地のデータは今のところ欠けているようである。今後の取り組みが必要であろう。

JICA プロジェクトの成果

1) バイオマス

熱帯林のバイオマスの推定方法自体は，1960～70 年代の国際生物学事業計画（IBP）時代にすでに確立されたと言ってもいいだろう。膨大な時間と労力を費やして伐倒調査を行った結果，幹直径と樹高を独立変数としてバイオマス推定を可能にした。しかし，手法は確立したが，バイオマス推定のために必ずしも適当な相対成長式が見つかるとは限らない。さらなるデータの蓄積が必要なのである。本プロジェクトで収集したデータは，ジャワ 2 地域，カリマンタン 2 地域，スマトラ 3 地域に及ぶ。それぞれ植林地と二次林を中心に調査を行ってきた。調査は毎木調査と伐倒調査である。最終的に毎木プロット数 50，伐倒サンプル数 1,700 となった。注目すべき点は，多くの伐倒サンプルで地下部，すなわち根の現存量のデータを収集していることである。これらの成果から，アカシアマンギウム林の相対成長式とバイオマスに関して，初代専門家であった宮國らが論文として発表した（Miyakuni *et al.*, 2005）。メルクシマツについても，森林立地学会誌 12 月号に掲載されたので是非ご覧になっていただきたい。

伐倒調査を行ったことのある研究者は当然のことながらご存じだろうが，同じ長さで一見したところ同じような太さの丸太なのに，持ち上げてみると樹種によって重さが明らかに違って驚くことがある。樹種によって材積重に大きな差があるからで，多様な樹種で構成される熱帯林では特に材積重のレンジが大きいようである。材積重のレンジが大きな林分では，幹直径を利用したバイオマス推定は注意が必要である。特に，相対成長式に用いられたサンプル数が少ない場合，バイオマスの過大評価，過小評価になることも十分にあり得る。もちろん，IBP で行ったような全伐を基本とした手法や，モノカルチャーの植林

地は例外である。ところで、山地林、熱帯ヒース林、泥炭湿地林などの環境ストレスが厳しいところでは、樹種多様性に乏しく、同時に林分を構成する樹種の材積重もレンジが絞られてくるのではないだろうか。もしそうだとすれば、森林タイプによってはより精度の高いバイオマス推定式の構築も可能になると思われる。このトピックについては現在カウンターパートである Chairil 氏と筆者らが検討を進めている。材積重に注目して、より精度のバイオマス推定方法確立を試みた ICRAF のグループがある (Ketterings *et al.*, 2001)。彼らは推定方法を比較した論文を発表しただけでなく、既存データや文献から材積重のデータを抜き出し、材積重データベースを WEB 上で公開している。

2) 土壌炭素

土壌炭素は地球上の炭素プールの中で最も大きな炭素プールである。そのため、炭素ストックの変化率が例えわずかであったとしても、全体で見ると大きな変化になりかねない。したがって、AR-CDM を実施する場合には土壌中の炭素ストックの変化を明らかにすることが必須の条件となっている。一方で、土壌炭素ストックの測定はもっとも困難な作業の一つであって、なおかつ費用も相当かかるものである。そこで、プロジェクトでは炭素ストックの空間変動と経年変化を明らかにするため、西ジャワ州の試験地で 2001 年以降毎年土壌調査を行ってきた。対象とした土壌は、熱帯の主要な土壌であるアクリソル、フェラルソル、ニティソルである。これらの土壌は成立が異なっていて、また地形的にも異なる。炭素ストックの空間変動を比較したところ、アクリソルやフェラルソルといった古く安定した土壌では、土壌炭素の空間分布に大きなばらつきは見られなかった。一方で、ニティソルのように比較的新しく、地形的に急峻な所に出現する土壌ではばらつきが大きくなった。このことは、フィールドにおいて炭素ストックを推定するための必要サンプル数に大きく影響する。現在論文として投稿中なので詳細な数値についてはここで紹介することができないが、プロジェクトの成果が公に認められれば、土壌炭素推定のための必要サンプル数は AR-CDM プロジェクト参加者にとって大いに参考になるはずである。その結果、時間と労力、さらには費用をも大幅に減らすことが可能になる。また、ジャワ島以外の地域であっても、土壌タイプが同じであれば活用できる可能性は十分にある。

炭素ストックの経年変化は、プロジェクトでも最重要視していた課題である。目指していたのは、土壌は少なくとも放出源ではないということを明らかにすることである。そのためには土壌中の炭素ストックが増加するか、あるいは

は変化がないことを証明しなければならない。決して炭素ストックが減少してはいけないのである。もし放出源でないということが明らかになれば、これは AR-CDM プロジェクトを実施するにあたって大きなアドバンテージとなる。つまり、目指す結果がプロジェクトで得られれば、その結果を根拠としてモニタリングの負担を大幅に軽減できるからである。プロジェクトでは、異なる樹齢のアカシアマンガウム既存林 (0, 3, 5, 8, 10 年生) を選び、土壌中の炭素ストックについて比較した。その結果、3 年生の林分を除き、有意な差は認められなかった。また、3 年生の林分についてさらに詳しい検討を行った結果、同じ土壌タイプでも粘土量に差が見られることがわかった。3 年生の林分では粘土量が著しく少なく、その差が炭素ストックに影響していると推察された。以上から、炭素ストックの差は立地の違いによって生じたもので、土壌中の炭素ストックは変化しないという結論が示唆された。同時に、異なる樹齢の林分を単純に選び、炭素ストックを比較して経年変化とすることの危険性をも指摘した。プロジェクトでは、同一サイトから毎年ほぼ同じ時期に土壌サンプルを採取して、植栽後の炭素ストックの変化を追跡してきた。炭素分析が遅れ、プロジェクト終了までには残念ながら結果を示すことはできなかったが、成果については速やかに公表していきたい。

プロジェクトでは、NC アナライザをプロジェクト開始当初に導入した。機器の耐用年数の問題もあるが、高い精度の分析結果が得られることを紹介しておきたい。今後 FORDA が主要な炭素分析可能な機関として一端を担うことになれば、それはプロジェクトの果たした大きな成果であったと言える。

3) データベース

データは収集するだけでは意味がない。多くの人に利用してもらってこそ価値がある。そこで、プロジェクトでは収集したデータをデータベースを用いて効率的に管理すると同時に、データベースをインターネットを介して公開することとなった。データの性質上、データベースの利用者として AR-CDM プロジェクト参加者と研究者を想定した。しかしながら、両者が同じレベルのデータを必要としないことは明白である。生データや詳細なデータは AR-CDM 参加者にとって理解し難いものになる可能性が高い。一方で、研究者は詳細なデータを喉から手が出るほどほしいケースもあるだろう。したがって、プロジェクトではデータベースを 2 つのレベルに分け、一つは AR-CDM プロジェクト参加者向けに WEB 上で公開し、もう一つは研究者向けに CD-ROM で配布することにした。

ここでは、2005年10月に公開を開始したAR-CDMプロジェクト参加者向けのデータベースについて簡単に紹介したい。先に述べたようにWEB上で公開するにあたって注意したことは、専門的な知識をなるべく必要とせずにバイオマスが推定できるような情報を提供することである。AR-CDMプロジェクト参加者は、データベースを利用して2つの推定方法を選択することができる。一つは相対成長式を使った推定方法である。これについては、インドネシアの主要植林樹種であるアカシアマンガウム、メルクシマツ、ショレアレプロスラ、チークが利用できるようになっている。もう一つの方法はIPCCのグッドプラクティスガイダンスに紹介されている拡大係数を使う方法である。データベースを利用する際には注意が必要である。データベースの情報を利用すれば、「伐倒調査は必要でなくなる」とは必ずしもならない。AR-CDMプロジェクト対象地において、実際にサンプル個体を選び、選択した相対成長式、あるいは拡大係数を用いることの妥当性を証明しなければならない。伐倒調査をまったくしないで済む方法は、今のところないのである。

バイオマスデータとしてWEB上では当面公開しないが、二次林のデータも所蔵している。二次林のデータは、西ジャワ州、西カリマンタン州、中央カリマンタン州、南スマトラ州、ジャンビ州から集められた。過去の攪乱も伐採、焼き畑、森林火災と様々である。ちなみに、ジャンビ州からはパラゴムのアグロフォレストリーのデータも収集してある。

今後とも研究者や研究機関によってバイオマス情報の収集が続けられるものと思われるが、バイオマスデータ収集そのものは常に大きな労力と時間を必要とするものである。「できることなら少ない労力で効果的にバイオマスを推定したい」、あるいは「データがあと少しあればさらに精度の高い推定ができるのに」といった場合に、データの共有ができることが望ましい。そういった意味では今後ともFORDAが中心になって、データベースの管理と更新作業の継続を行うと同時に、データ資産の共有化とネットワーク化の推進を行うことを期待する。その際には、すべてのデータを無秩序に取り込むのではなく、データの精度を吟味することが重要になってくるが、それは今後の課題になるだろう。

4) 木炭施用成果

先に木炭を森林経営に組み込むことを軌道修正したと述べたが、プロジェクトでは決して活動を止めたわけではなく、カウンターパートと協力して調査を続け、貴重な結果を得ている。木炭施用の効果について筆者は本来の担当分野ではないので、成果の詳細については別の機会に譲りたいと思うが、簡単に少

しだけ紹介したい。ポット苗試験の結果から、初期成長に及ぼす木炭の効果は顕著であった(写真1)。木炭混入率の違いによる差は認められなかったが、木炭混入の有無によって結果は大きく異なった。そのメカニズムについてはさらなる研究が必要であろうが、土壌改良材としての効果や根粒菌や菌根菌といった微生物の働きが影響したようである。木炭施用効果については、Chairil氏が2004年にアメリカ、ジョージア大学で開催されたワークショップと、2005年8月にオーストラリアで開催されたIUFRO国際大会で発表を行い、さまざまな反響があったことを記しておく。

5) おわりに

本稿を執筆中に、中国提出のCDM植林の方法論がAR-CDMワーキンググループによってようやく承認された。AR-CDMプロジェクトが本格的に動き始める大きなきっかけになると思われる。プロジェクトは終了したが、これからが本当の始まりである。インドネシアでは、プロジェクト期間中に爆弾テロを始め世界中を騒がせるような数々の事件が起こった。また、ルピア安や石油高騰を受けて、2006年以降も混乱が生じる可能性は少なくない。AR-CDMプロジェクトを実施するには、国としてのリスクを感じるのは確かである。しかし、インドネシアにおいても吸収源としての植林活動は絶対に不可欠である。2005年11月14日付けの現地紙コンパスによると、現林業大臣であるカバン氏



写真1 木炭施用効果の比較 (*Acacia mangium*)。木炭混入率は、左から0, 5, 10, 15% (2005年4月, 仲摩撮影)

の業績評価が著しく高いとのことである。深刻な問題とされた違法伐採への積極的な取り組みが評価されたもので、政党出身で業界にしがらみがないために実現可能であったとされる。既存の政治や社会の枠組みにとらわれ、ともすれば硬直しがちなインドネシアにおいては注目すべき変化である。AR-CDM プロジェクトのように新しいことを始めるにあたって、喜ぶべき環境が整いつつあると言っていい。カウンターパート機関であった FORDA についても、プロジェクト活動を通して培った実績をふまえ、今後の活躍が期待される。また、大学や研究機関には人材資源は豊富にある。この機会を逃すことなく AR-CDM プロジェクト実現に向けて、機運を高めていきたいものである。

最後に、本稿で述べた成果はプロジェクトに従事した全ての長期専門家、短期専門家、カウンターパートの努力の結晶であることを記しておきたい。

〔参考文献〕 安藤和哉 (2004) インドネシア炭素固定森林経営現地実証調査. 熱帯林業 No. 59. ICRAF (1998) Alternatives to slash-and-burn in Indonesia. Summary report & synthesis of phase II. IGES and NIES (2001) Improving estimates of annual biomass increment and forest aboveground biomass in Southeast Asia using GIS approach and site- or specific-allometric regressions. IPCC (2003) Good Practice Guidance for LULUCF. Ketterings *et al.* (2001) Reducing uncertainty for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *For. Ecol. Manage.* 146. 小林紀之 (2004) 地球温暖化と森林ビジネス. 日本林業調査会. Miyakuni *et al.* (2005) Allometric biomass equations, biomass expansion factors, and root-to-shoot ratios of planted *Acacia mangium* forests in West Java, Indonesia. *J. For. Plan.* Rahajoe, J.S. and Koyama, T. (2003) The relationship between N, P returned via litter production and nutrient use efficiency of heath and peat swamp forests in Central Kalimantan. *TROPICS* vol. 13. 米田 剛 (2000) 森林生態系における物質分解の地域性と普遍性. *TROPICS* vol. 9.