

熱帯地域の造林地におけるバイオマス推定のための 汎用相対成長式の提案

平塚基志^{*1}・山ノ下(山田)麻木乃^{*2}・森川 靖^{*3}

1. はじめに

熱帯地域において、木材生産を目的とした産業植林や荒廃地の修復を目的とした環境造林が盛んに行われている。(社)海外産業植林センターによると、製紙企業等が海外で行った植林面積は2008年末までに約700,000 haに達しており、環境造林については、(財)国際緑化推進センターが実施している分だけでも2009年3月現在で5,500 haを超えている。これらの活動の多くは、造林活動に伴う吸収量をクレジットとして評価する吸収源クリーン開発メカニズム(Afforestation/Reforestation Clean Development Mechanism, A/R CDM)と関連し、造林地における吸収量をクレジット化することが視野に入れられている。他方、熱帯地域の荒廃地修復を目的とした環境造林では、造林に伴う水源涵養機能の改善等の公益的機能の回復も重要視されており、地域特性に応じた樹種選定と緑化への努力が、政府、企業、そしてNGOといった多様な活動レベルで実施されている。

こうした熱帯地域での造林活動では、植栽木の活着とその後の中長期的な成長が重要な鍵となっており、多大な努力と資金が注がれる。活着後の樹木の生育が良好で成林に至れば、造林プロジェクトとして成功事例となるが、活着までの努力が多大であるために、その後の中長期的な生育状況の調査にはあまり力点が置かれず、結果として造林実績としての

成功例の紹介はバイオマス評価等の生物学的な手法ではなく、写真提供にとどまる場合が多い。

造林地における植栽木のバイオマス増加は、立地の土壌条件の改良を通じた水土保持機能に寄与するばかりでなく、その量は、地域における木材生産(いわゆる林業生産)としての成否を握る重要な情報となる。したがって、成林後のバイオマス評価は造林地の管理方法の一つである。こうした観点から、これまでは成林後の成長指標として、胸高直径(DBH, Diameter at Breast Height)、樹高、立木密度等が調査されてきたが、造林地の生育状況をより効果的に示すバイオマス評価までには、多くの場合で至っていない。この一因としては、DBHや樹高をパラメータとしてバイオマス評価を行う相対成長式の作成に多大な労力が必要になること、さらに、このような相対成長式は植栽樹種及び地域によってパラメータが異なるとされているために、全ての造林地において、植栽樹種さらには植栽密度別に相対成長式を作成しなければならない点が挙げられる。これらの理由から、実際に熱帯地域で植栽されている樹種についてのバイオマスデータは大変少なく、したがって相対成長式そのものも極めて数少ないのが現状である。

筆者らは、(財)国際緑化推進センター、(社)海外産業植林センターの事業に参画し、産業植林、環境造林に利用される主な樹種のバイオマス評価を行ってきた。これまでに行った調査結果については、本

Motoshi Hiratsuka, Makino Yamanoshita (Yamada), Yasushi Morikawa : The General Allometric Equations for Estimating Biomass in Artificial Forest in the Tropics

^{*1}三菱UFJリサーチ&コンサルティング、^{*2}早稲田大学大学院人間科学研究科、^{*3}早稲田大学人間科学学術院

誌でも報告してきた（山田ほか 1999・2000a・2000b・2000c・2004，平塚ほか 2005a・2005b）。こうした調査結果より，一般的な立木密度で特定の DBH 範囲内におさまる造林地であれば，汎用的な相対成長式を用いることで，樹種及び地域に関わらずバイオマス推定を可能とすることが明らかとなった。上述した通り，造林地におけるバイオマス推定にあたっては，各造林地用に固有の相対成長式を作成することで高い精度のバイオマス推定が可能であるが，一方でこうした作業には多大な労力と時間が必要になる。このため，バイオマスを推定する目的（造林地の生育状況の簡易的な把握用等）に応じて，簡易な方法を示す必要性があると考えられる。本論で提案する汎用相対成長式は，熱帯地域の造林地での毎木調査による DBH データと造林面積だけでバイオマスを推定できるものである。対象とする造林地のバイオマス予測に利用されれば幸いである。

2. 方法

各造林地における伐倒試料木のバイオマス測定は，（社）海外産業植林センター & （財）国際緑化推進センター（2009）に示された方法によった。その概略は以下の通りである。

それぞれの林分で設定した調査プロットにおいて，全立木の DBH を測定し，それぞれのプロットでは小径木から大径木まで均等に含まれるように伐倒試料木を選んだ。伐倒試料木は，伐倒後に器官別（幹，樹皮，枝，葉，根）に分け，幹はさらに 2 m 間隔で玉切りにした。その後，各器官から小サンプルを採取し絶乾率を求めた。それぞれの伐倒試料木のバイオマスを器官別に算出したあと，器官別で以下の式(1)で示す相対成長式を作成した。

$$M = a(DBH^2)^b \quad (1)$$

相対成長式の従属変数 (M) には器官別，地上部全体，そして全樹体のバイオマスを，独立変数は DBH の 2 乗とした。係数 a 及び b は最小二乗法によって求めた。幹材積も同様に DBH の 2 乗を独立変数とする相対成長式から算出した。

根については一部の調査地でバイオマス測定を行った。測定にあたっては，一部の伐倒試料木について地上部（幹，樹皮，枝，葉）と抜根した地下部（根）の重量割合を求め，その割合から他の伐倒試料木の地下部（根）のバイオマスを推定した。幹材積については，玉切りにした後に断面の直径（樹皮付き，樹皮なし）を測定し，スマリアン式によって算出した。

3. 結果及び考察

3-1 これまでの調査結果

それぞれの調査地において，伐倒試料木から作成した相対成長式の係数及び決定係数を表 1 に示す。それぞれの調査地で，器官別に作成した相対成長式ではそれぞれ満足な相関を得ることができた。なお，本調査では林床植物のバイオマスも測定したが，地上部バイオマス及び地下部バイオマスを含めた全体のバイオマスには，林床植物を含んでいない。

3-2 汎用相対成長式の提案

これまでに得た 13 箇所の調査地点における全 63 本の伐倒試料木（根及び全樹体について 9 調査地点で 30 本）の DBH と器官別バイオマス及び幹材積の相対成長関係の係数を表 2，DBH と地上部バイオマスの関係を図 1 に示す。伐倒試料木の立地条件は，主に産業植林で用いられる *Acacia mangium* から環境造林で用いられる *Dalbergia latifolia* までと異なり，さらに植栽密度は $625 \sim 1,667 \text{ trees ha}^{-1}$ と異なるものの，DBH と器官別バイオマス及び幹材積には高い相関関係が認められた。

さらに，各調査地において得た毎木調査の結果を，調査地ごとに作成した相対成長式と，汎用相対成長式に代入してバイオマスを推定した結果，表 3 及び図 2 に示すように大きな誤差がなかった。以上の結果から，熱帯地域における造林地のうち，立地条件（標高，雨量等）が本調査地と大きな違いがなく，植栽木の容積密度も本調査の伐倒試料木と大差ない範囲であり，かつ一般的な植栽密度 ($600 \sim 1,700 \text{ trees ha}^{-1}$) 及び DBH 幅が $7 \sim 35 \text{ cm}$ 程度であ

表 1 各調査地で器官別バイオマス及び幹材積の推定のために作成した相対成長式の係数及び決定係数

調査地	南スマトラ			東ジャワ			北部タイ			ロンボク島(インドネシア)			南ベトナム			北部PNG	
	<i>Swietenia macrophylla</i>	<i>Acacia mangium</i>	<i>Acacia mangium</i>	<i>Swietenia macrophylla</i>	<i>Pinus merkusii</i>	<i>Pinus merkusii</i>	<i>Tectona grandis</i> (17年生)	<i>Tectona grandis</i> (22年生)	<i>Tectona grandis</i>	<i>Cassia stamea</i>	<i>Azadirachta indica</i>	<i>Dalbergia latifolia</i>	<i>Acacia mangium</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Acacia mangium</i>	<i>Acacia mangium</i>	<i>Acacia mangium</i>
幹	<i>a</i>	1.020×10 ⁻¹	1.699×10 ⁻¹	8.040×10 ⁻²	1.786×10 ⁻²	1.205×10 ⁻¹	1.428×10 ⁻¹	1.063×10 ⁻¹	4.561×10 ⁻¹	1.111	1.970×10 ⁻¹	4.448×10 ⁻¹	9.046×10 ⁻²	1.009×10 ⁻¹	1.027×10 ⁻¹	1.200	0.909
	<i>b</i>	1.180	1.109	1.219	1.444	1.136	1.133	7.934×10 ⁻¹	9.352×10 ⁻¹	0.972	0.940	9.352×10 ⁻¹	1.267	1.270	1.270	1.270	1.270
	<i>r</i> ²	0.977	0.977	0.987	0.855	0.998	0.965	0.965	0.900	0.972	0.900	0.940	0.992	0.992	0.955	0.955	0.955
枝	<i>a</i>	2.332×10 ⁻⁵	4.593×10 ⁻³	3.887×10 ⁻⁴	9.565×10 ⁻⁷	7.810×10 ⁻⁴	1.089×10 ⁻³	1.804×10 ⁻²	1.804×10 ⁻²	2.237×10 ⁻⁴	9.631×10 ⁻⁴	1.117×10 ⁻³	6.425×10 ⁻²	7.458×10 ⁻³	3.170×10 ⁻³	1.454	0.628
	<i>b</i>	2.272	1.491	1.817	2.736	1.809	1.729	1.383	1.383	2.169	2.115	1.612	1.021	1.419	1.454	1.454	1.454
	<i>r</i> ²	0.953	0.919	0.815	0.851	0.979	0.918	0.922	0.922	0.966	0.896	0.986	0.926	0.924	0.924	0.924	0.924
葉	<i>a</i>	4.749×10 ⁻³	8.589×10 ⁻⁵	2.273×10 ⁻⁴	2.474×10 ⁻⁴	3.393×10 ⁻³	5.240×10 ⁻⁴	2.068×10 ⁻²	2.068×10 ⁻²	2.396×10 ⁻³	2.027×10 ⁻²	6.845×10 ⁻³	1.035×10 ⁻³	1.764×10 ⁻⁴	2.154×10 ⁻²	0.981	0.597
	<i>b</i>	1.171	1.865	1.650	1.657	1.329	1.607	1.025	1.025	1.481	0.885	1.098	1.541	1.973	0.981	0.981	0.981
	<i>r</i> ²	0.929	0.965	0.865	0.763	0.947	0.881	0.892	0.892	0.812	0.492	0.816	0.946	0.972	0.597	0.597	0.597
根	<i>a</i>	3.995×10 ⁻²	3.436×10 ⁻²	3.841×10 ⁻²	3.455×10 ⁻³	2.264×10 ⁻²	3.115×10 ⁻²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>b</i>	1.180	1.109	1.219	1.444	1.249	1.170	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>r</i> ²	0.977	0.977	0.987	0.855	0.993	0.992	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
地上部	<i>a</i>	5.058×10 ⁻²	1.291×10 ⁻¹	4.978×10 ⁻²	5.094×10 ⁻³	7.798×10 ⁻²	9.303×10 ⁻²	2.693×10 ⁻¹	2.693×10 ⁻¹	3.882×10 ⁻²	4.120×10 ⁻²	4.382×10 ⁻¹	1.338×10 ⁻¹	9.161×10 ⁻²	1.467×10 ⁻¹	1.190	0.980
	<i>b</i>	1.337	1.201	1.333	1.682	1.272	1.255	1.030	1.030	1.408	1.470	0.989	1.234	1.328	1.328	1.328	1.328
	<i>r</i> ²	0.995	0.966	0.989	0.876	0.994	0.966	0.958	0.958	0.979	0.954	0.998	0.992	0.962	0.962	0.962	0.962
全樹体	<i>a</i>	8.241×10 ⁻²	1.606×10 ⁻¹	8.379×10 ⁻²	7.120×10 ⁻³	9.979×10 ⁻²	1.225×10 ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>b</i>	1.301	1.188	1.301	1.651	1.269	1.239	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>r</i> ²	0.993	0.968	0.994	0.874	0.998	0.972	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
幹材積 (樹皮付き)	<i>a</i>	1.685×10 ⁻¹	4.200×10 ⁻¹	4.131×10 ⁻³	1.106	3.202×10 ⁻¹	3.149×10 ⁻¹	9.738×10 ⁻¹	9.738×10 ⁻¹	1.420	1.281×10 ⁻²	1.866	1.469×10 ⁻¹	1.670×10 ⁻¹	3.822×10 ⁻¹	1.146	0.859
	<i>b</i>	1.206	1.098	1.796	0.911	1.111	1.138	0.715	0.715	0.708	1.641	8.250×10 ⁻¹	1.249	1.279	1.279	1.279	1.279
	<i>r</i> ²	0.988	0.991	0.979	0.534	0.996	0.966	0.629	0.629	0.855	0.645	0.983	0.989	0.987	0.987	0.987	0.987
幹材積 (樹皮なし)	<i>a</i>	1.326×10 ⁻¹	2.965×10 ⁻¹	1.219×10 ⁻²	2.159	1.700×10 ⁻¹	1.598×10 ⁻¹	6.228×10 ⁻¹	6.228×10 ⁻¹	1.938×10 ⁻¹	5.190×10 ⁻³	1.519	1.170×10 ⁻¹	3.107×10 ⁻¹	3.205×10 ⁻¹	1.155	0.850
	<i>b</i>	1.218	1.129	1.585	0.777	1.162	1.197	0.775	0.775	1.049	1.772	8.415×10 ⁻¹	1.251	1.126	1.126	1.126	1.126
	<i>r</i> ²	0.987	0.997	0.926	0.468	0.988	0.961	0.678	0.678	0.989	0.691	0.976	0.990	0.975	0.975	0.975	0.975

(出典) 山田ほか、1999・2000a・2000b・2000c、平塚ほか、2003・2005a・2005b・2005c、森川 2005、国際緑化推進センター 2000・2002・2003

れば、樹種及び調査地に大きく依存せず、バイオマス推定のための汎用相対成長式を適用することで、バイオマス評価が可能であることが分かった。

なお、さらに簡易的な方法として、直径の毎木調査データがなく、平均直径からバイオマスを推定す

表 2 器官別バイオマス及び幹材積の推定のために作成した汎用相対成長式の係数及び決定係数

器官別バイオマス・幹材積	<i>n</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i> ²
バイオマス				
幹	63	6.892×10 ⁻²	1.246	0.928
枝	63	3.607×10 ⁻²	1.121	0.658
葉	63	1.120×10 ⁻²	1.079	0.779
根	30	4.495×10 ⁻²	1.120	0.864
地上部	63	1.266×10 ⁻¹	1.201	0.962
全樹体	30	1.278×10 ⁻¹	1.225	0.980
幹材積				
樹皮付き	63	5.734×10 ⁻²	1.398	0.868
樹皮なし	63	3.367×10 ⁻²	1.454	0.873

表 3 各調査地で作成した相対成長式と汎用相対成長式でそれぞれ推計した地上部バイオマス及び誤差（現存する毎木調査データに基づいた評価結果）

調査地	樹種	地上部バイオマス		誤差 (%)
		調査地ごとの相対成長式 (Mg ha ⁻¹)	汎用相対成長式 (Mg ha ⁻¹)	
南スマトラ (インドネシア)	<i>Swietenia macrophylla</i> (20 年生)	269.2	266.6	1.0
南スマトラ (インドネシア)	<i>Acacia mangium</i> (6 年生)	142.2	138.3	2.8
東ジャワ (インドネシア)	<i>Swietenia macrophylla</i> (16 年生)	100.6	113.2	11.1
東ジャワ (インドネシア)	<i>Pinus merkusii</i> (14 年生)	227.1	220.1	3.2
北部タイ (タイ)	<i>Tectona grandis</i> (17 年生)	70.8	77.1	8.2
北部タイ (タイ)	<i>Tectona grandis</i> (22 年生)	82.4	81.8	0.8
ロンボク島 (インドネシア)	<i>Cassia siamea</i> (5 年生)	67.6	80.1	15.7
ロンボク島 (インドネシア)	<i>Azadirachta indica</i> (5 年生)	93.4	96.1	2.8
ロンボク島 (インドネシア)	<i>Dalbergia latifolia</i> (5 年生)	62.5	53.0	18.0
南ベトナム (ベトナム)	<i>Acacia mangium</i> (6 年生)	121.1	115.8	4.6
北部 PNG (パプア・ニューギニア)	<i>Acacia mangium</i> (4 年生)	59.3	56.4	5.2
北部 PNG (パプア・ニューギニア)	<i>Acacia mangium</i> (7 年生)	109.2	104.2	4.8

(出典) 山田ほか 1999・2000a・2000b・2000c, 平塚ほか 2003・2005a・2005b・2005c, 森川 2005, 国際緑化推進センター 2000・2002・2003

る方法として、平均直径を相対成長式に当てはめ、平均個体バイオマスに現存立木密度を乗じれば、およそのバイオマスも予測可能であろう。

3-3 最後に

CDM プロジェクトから発行される CER (Certified Emission Reduction) や CDM 以外の自主的なプロジェクトから発行されるクレジット (一般的に VER, Voluntary/Verified Emission Reduction) が、カーボン・オフセットで用いられるようになってきた。VER 市場は 2008 年で約 400 百万米ドルのクレジット売買実績があった報告されており (Capoor and Ambrosi 2009), 市場は拡大傾向にある。こうした中、森林吸収源由来のクレジットに対する需要も増加傾向にあり、中でも公益的機能の回復等の副次的効果の大きなプロジェクトについては、発行されるクレジットにプレミアム価格が付くことも珍しくはなくなっている (Kollmuss ら 2008)。

本論で提案した汎用相対成長式は、造林地において簡易かつある程度の精度 (誤差率が最小 0.8%~

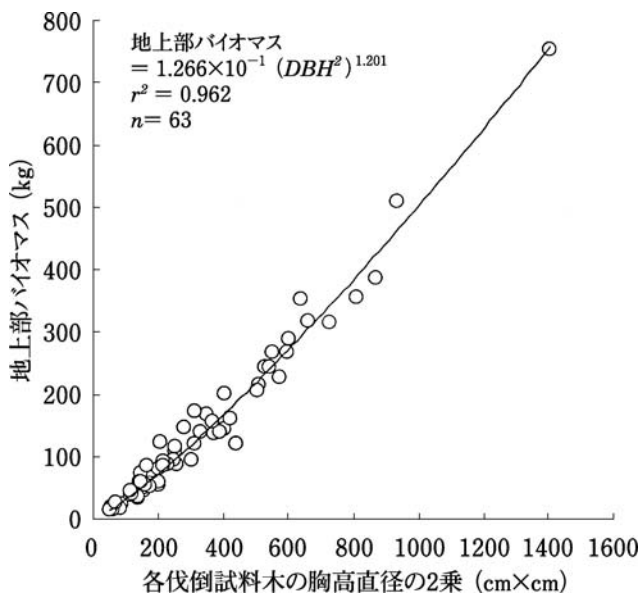


図 1 各伐倒試料木の DBH の 2 乗 (cm×cm) と地上部バイオマス (kg) の関係

最大 18.0%, 平均 6.5% 程度) をもってバイオマス評価が可能であることから、植林事業/プロジェクトを評価するにあたり効果的であろう。さらに、クレジット発行を視野にいれた造林地においては、吸収量評価のための伐倒調査という多大なコストと労力が必要となる作業を軽減させる効果もある。もちろん、高い精度を維持するには調査地ごとにも伐倒調査を必要に応じて実施する必要があるが、ある程度の精度でバイオマス情報を収集する際などには十分に活用できると考えられる。こうした場でも、汎用相対成長式が用いられれば幸いである。

謝 辞

本調査を行うにあたっては、(社)海外産業植林センター及び(財)国際緑化推進センターより多大なご協力をいただいた。現地での調査及び調査結果の分析にあたっては、(財)国際緑化推進センターの森徳典氏及び大角泰夫氏に貴重なアドバイスをいただいた。協力して頂いた皆さまに感謝致します。

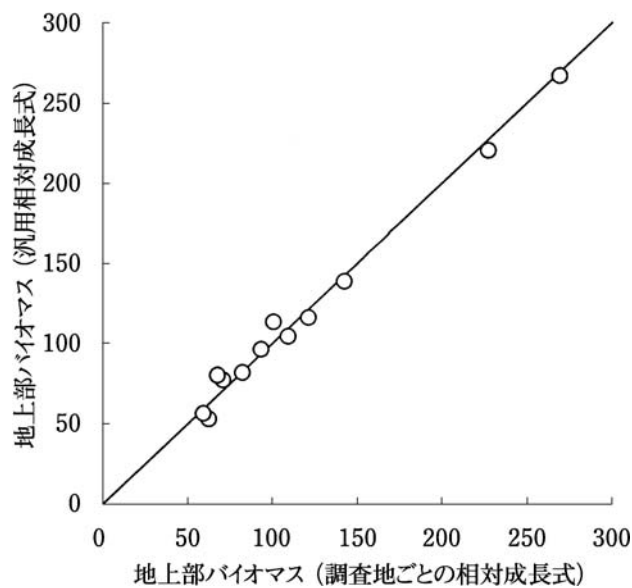


図 2 各調査地で作成した相対成長式と汎用相対成長式でそれぞれ推計した地上部バイオマスの関係
図中の線は $y=x$ を示す。

(出典) 山田ほか 1999・2000a・2000b・2000c, 平塚ほか 2003・2005a・2005b・2005c, 森川 2005, 国際緑化推進センター 2000・2002・2003

- 〔引用文献〕 1) Capoor K., and Ambrosi P. 2009. State and trend of the carbon market 2009. The World Bank. (Web サイトで入手可能, 以下同じ: <http://www.worldbank.org/reference/>). 2) Hiratsuka M., Toma T., Yamada M., Heriansyah I., and Morikawa Y. 2003. A general allometric equation for estimating biomass in *Acacia mangium* plantations. In: Proc. Inter. Conference on tropical forests and climate change, Manila, Philippines. Oct. 21-22, 2003. p 212-218. 3) Hiratsuka M., Chingchai V., Kantinan P., Sirirat J., Sato A., Matsunami C., Osumi Y., and Morikawa Y. 2005a. Biomass of trees and carbon stock in the soil of 17- and 22-year-old stands of teak (*Tectona grandis* L.f.) in northern Thailand. TROPICS, Vol. 14: p377-382. 4) 平塚基志・森川靖・長塚耀一・大角泰夫 2005b 南スマトラの森林修復によるバイオマス増加 熱帯林業 62: p 58-64. 5) 平塚基志・塩山義之・佐藤顕信・森川靖・長塚耀一 2005c 東ジャワにおける人工林のバイオマス評価 熱帯林業 63: p 47-54. 6) Kollmuss A., Zink H., and Polycarp C. 2008. Making Sense of the

Voluntary Carbon Market — A Comparison of Carbon Offset Standards—. WWF Germany. (http://www.panda.org/what_we_do/footprint/climate_carbon_energy/climate_deal/publications/). 7) 森川 靖 2004 森林の CO₂ 吸収源としての評価と問題点 環境資源工学 51 : p 228-233. 8) (社)海外産業植林センター 2009 日本企業の海外産業植林プロジェクト一覧 (http://www.jopp.or.jp/research_project/project.html). 8) (社)海外産業植林センター・国際緑化推進センター 2009 「Manual of Biomass Measurements in Plantation and in Regenerated Vegetation」 (<http://www.jopp.or.jp/jigyo/biomassmanual/index.html#contents>). 9) 山田麻木乃・花水恭二・川添哲也・丹下 健・森川 靖 1999 産業植林早生樹種の炭素固定量評価 (1) 西オーストラリアの *Eucalyptus globules* 人工林 46 : p 23-30. 10) 山田麻木乃・花水恭二・大道 隆・丹下 健・森川 靖 2000a 産業植林早生樹種の炭素固定量評価 (4). パプアニューギニアの *Acacia mangium* 人工林及び総まとめ 熱帯林業 49 : p 20-33. 11) 山田麻木乃・松田 学・

丹下 健・森川 靖 2000b 産業植林早生樹種の炭素固定量評価 (3) 南アフリカの *Eucalyptus grandis* 人工林 熱帯林業 48 : p 18-24. 12) 山田麻木乃・鶴見和恒・原口直人・川添哲也・山ノ下卓・丹下 健・森川 靖 2000 c 産業植林早生樹種の炭素固定量評価 (2) ベトナムの *Acacia mangium*, *A. auriculiformis*, *Eucalyptus camaldulensis* 人工林 熱帯林業 47 : p 33-39. 13) 山田麻木乃・藤間 剛・平塚基志・森川 靖 2004 短伐期施行産業植林地の地上部現存量と収穫による養分持ち出し 熱帯林業 61 : p 47-5214) (財)国際緑化推進センター 2000 海外植林情報整備事業・植林適地等把握調査 (平成 12 年度実行報告書). 15) (財)国際緑化推進センター 2002 海外植林情報整備事業・植林適地等把握調査 (平成 14 年度実行報告書). 16) (財)国際緑化推進センター 2003 海外植林情報整備事業・植林適地等把握調査 (平成 15 年度実行報告書). 17) (財)国際緑化推進センター 2009 開発途上国における植林実績 (Web サイトで入手可能 : http://www.jifpro.or.jp/3reforestation/3reforestation_2.htm).

////////////////////////////////////
平成 21 年度 CDM 植林国際パネルディスカッションのご案内
 //////////////////////////////////////

地球温暖化防止に果たす森林の役割の重要性が認識される中、CDM 植林に加え、COP13 以降 REDD について国際的関心が高まっています。

(財)国際緑化推進センターでは、世界の森林の保全造成を推進するという観点から、CDM 植林による荒地復旧と REDD による森林の保全・劣化の防止をテーマとして、次のとおり、国際パネルディスカッションを開催します。当センターのホームページ (www.jifpro.or.jp) において、参加者の受付を行っております。

1. 日 時 平成 22 年 3 月 4 日 13 : 30 ~ 16 : 30
2. 場 所 国立オリンピック記念青少年総合センター
 (〒151-0052 渋谷区代々木神園町 3 番 1 号)
 国際交流棟 国際会議室
3. 出席者 (予定)
 コーディネータ 天野 正博 早稲田大学 教授
 パネラー 武藤 信之 林野庁 (世界の議論の動向と我が国の取組方向)
 Daniel Murdiyarso CIFOR (インドネシアにおける REDD の取組)
 佐々木昭彦 日本工営(株) 環境技術部 (ベトナムにおける CDM の取組)
 Ms. Kate Horner Friends of the Earth US (NGO と CDM 植林, REDD)
4. 参加費 無料 (同時通訳付き)
5. 定 員 100 名程度