

第一約束期間における京都議定書 3 条 3 項林の炭素吸収量の試算

Estimating the Amount of Carbon Sequestered in the Article 3.3 Forests under the Kyoto Protocol in the First Commitment Period

広嶋 卓也

Hiroshima, Takuya

キーワード: 京都議定書 3 条 3 項, 新植植林・再植林(AR), 森林減少(D), 炭素吸収量, 第一約束期間

要約: 本論では, 2008~2012年の第一約束期間における京都議定書 3 条 3 項林の炭素吸収量を国レベルで予測した。新規植林・再植林(AR)の面積は, 他の土地利用から森林への転入面積から, 森林減少(D)の面積は, 森林から他の土地利用への転出面積からそれぞれ推定した。そして過去のAR・D林面積の推移の傾向を将来に延長するため, 前者にべき乗関数を, 後者に対数関数をそれぞれあてはめて経年推移を外挿した。さらに2008年当初および2013年当初の累積AR林面積の齢級配置, 2008~2012年の合計D林面積の齢級配置を求め, これらに幹材積, 拡大係数, 容積密度, 炭素含有率を乗じて炭素蓄積量を求めた。第一約束期間の 3 条 3 項林の炭素吸収量は, 蓄積変化法により, (2013年当初累積AR林の炭素蓄積量) - (2008年当初累積AR林の炭素蓄積量) - (2008~2012年合計D林の炭素蓄積量) として求められ, 計算の結果, 約381万t-C (=約76万t-C/年)の排出と予測された。

Abstract: The purpose of this study was to predict the amounts of carbon sequestered in the Article 3.3 forests under the Kyoto Protocol during the first commitment period on a national scale. The land use change from forests to other land covers and uses was regarded as the Afforestation and Reforestation (AR)

activities, and the contrary land use change was regarded as the Deforestation (D) activities. The areas of AR and D activities from 1976 to 1995 were identified using the national statistics. Furthermore, the time series changes in the areas were extrapolated from 1995 to 2012, the end of the first commitment period, using the power series and logarithmic functions fitted to the observed AR and D areas, respectively. Then the age class distributions of cumulative AR areas at 2008 and 2013 and cumulative D area from 2008 to 2012 were identified, which were converted to the amounts of carbon stock by multiplying them by stem volumes, biomass expansion factors, wood density and carbon content. By the stock change method, the amounts of carbon sequestration in the Article 3.3 forests during the first commitment period was calculated as the carbon stock in cumulative AR forest at 2013 minus the carbon stock in cumulative AR forest at 2008 minus the carbon stock in cumulative D forest from 2008 to 2012. As a result, the Article 3.3 forests would sequester approximately 3.81 million t-C during the first commitment period (= 0.76 million t-C/yr).

Keywords: afforestation and reforestation (AR), Article 3.3 of Kyoto protocol, carbon sequestration, deforestation (D), first commitment period

1. はじめに

京都議定書によれば国内森林吸収源は、3条3項林、すなわち1990年以降の新規植林(A)・再植林(R)・森林減少(D)と、3条3項林、すなわち1990年以降に森林経営(FM)の行われた森林からなる。3条4項林による吸収量は2008～12年の第一約束期間に、マラケシュ合意に基づき、3条3項の排出量を相殺する吸収量+1,300万t-C/年まで認められており、我が国では3条4項林が実質的な吸収源となることから、これまでは3条4項林の特定方法やそこでの吸収量の予測に関する研究が比較的多くなされてきた(たとえばHiroshima 2004, Nakajima and Hiroshima 2005, 中島ら2006)。一方、3条3項林について、そもそも我が国の森林と非森林の間の土地利用変化は、毎年、全森林面積の0.1%にも満たないことから(松本 2005)、そこでの吸収量/排出量は我が国の炭素収支全体から見ればごく僅かである。そうした事情もあり、3条3項林については、主として衛星画像を用いた特定手法に関する研究が進められているが(たとえば堀ら 2002, 栗屋 2005, Lee *et al.* 2005)、そこでの吸収量/排出量の計算や予

測にまで踏み込んだ研究はみられない。そこで本論では第一約束期間における3条3項林の炭素吸収量を国レベルで試算することを目的とする。

2. 方法

林野庁によれば、3条3項の新規植林 (Afforestation, 以下A) は、2012年から遡って過去50年来森林がなかった土地への1990年以降の植林、すなわち、1962～1989年 (の12月31日) まで非森林であった土地から1990年以降の森林への転入と定義され、再植林 (Reforestation, 以下R) は、1990年以来一度も森林でなかった土地への植林、すなわち、過去50年以内に森林から非森林へ転出後の1990年以降の森林への再転入と定義される。少なくとも、第一約束期間の炭素吸収量を計算する上ではAとRの活動を区別する必要はないので、本論では両者を一括してARと呼ぶことにする。すなわち1990年以降の他の土地利用から森林への転入をAR林とみなす。また森林減少 (Deforestation, 以下D) は、1990年以降の森林から他の土地利用への転出と定義される。

本論では、これらAR・D林の場所は特定せずに、統計資料を用いてそれらの発生時期と面積のみを特定する。また、便宜的にこれらAR・Dに関わる転入・転出は人工林のみで起きると仮定する。この仮定は、後にAR・D林の面積を材積に換算する際に利用可能な収穫表が人工林に限定されることによるものである。AR林は定義から、人工林とみなして問題ないが、D林は現実には天然林を含み、一般に天然林より人工林の方が炭素蓄積量は大きいことから、D林に由来する炭素排出量は、本論の計算では若干過大に計上される可能性がある。

2.1. 統計資料による過去のAR・D林面積の推定

過去のD林面積は、国土庁 (1976～1994) の国土統計要覧における「7.土地利用の形態－(2)利用転換－①土地利用転換の概況」の1976～1994年全国計の転出面積から推定した。D林に該当するものは各年の、転換源：林地、用途：都市的土地利用 (住宅地、工業用地、公共用地、レジャー施設用地、その他の都市的土地利用)・農林業的土地利用 (農地)・その他、の合計面積である。ただし、この資料の注意書きにあるように、林地からの転換には1ha未満のものは含まれていない。現実には私有林の大半をしめる零細林家の所有規模を考えれば、

1 ha未満の転出は無視できないと考えられるため、別途、1 ha未満のものまで含めて集計された、林野庁内部資料「森林面積の増減の事由別現況表 (1990～1994年全国計)」の「減の理由: 農用地へ・レジャー施設用地へ・住宅等の建物敷へ・採石・採土用地へ・その他」の合計面積を参考にした。この林野庁資料は、D林の実績値として信頼するに足ると考えられるが、筆者が入手可能であったものは1990～94年の期間に限定されるため、将来にわたるD林面積の把握に用いることはできない。そこでこの資料のD林面積と、国土統計要覧から集計した同時期の転出面積との比からD林補正係数を求めた。すなわち、補正係数=(1990～1994年の林野庁内部資料D林面積)/(1990～1994年の国土統計要覧転出面積)。計算の結果、補正係数の値は1.3となり、この値は時期によらず一定であると仮定する。すなわち便宜的に、国土統計要覧の1976～1994年の転出面積を1.3倍することによりD林面積を推定する。

過去のAR林面積は、林野庁(2005)の林業統計要覧時系列版より1976, 1981, 1984, 1986, 1990, 1995各年当初の森林面積全国計の隣り合う2時期間の差と、その間の転出面積の合計値を、その間の年数で除することにより便宜的に転入面積を求め(∴時期*i*+1当初の森林面積=時期*i*当初の森林面積+その間の転入面積-その間の転出面積)、この面積を先と同様に、林野庁内部資料「森林面積の増減の事由別現況表 (1990～1994年全国計)」の「増の理由: 原野から・農廢地から・その他」の合計面積で補正することにより推定した(補正係数2.0)。

2.2. 将来のAR・D林面積の予測

こうして推定した1976～94年のAR・D林面積に、観測年を説明変数とする適当な関数を通常の最小二乗法で当てはめることにより、1995～2012年のAR・D林面積を外挿する。

1990年以降の転入林分は第一約束期間終了まで伐採されないと仮定すると2008年当初の齢級別AR林累積面積は、1 齢級が2003～2007年のAR林面積合計、同様に2 齢級が1998～2002年、3 齢級が1993～1997年、4 齢級が1990～1992年のAR林面積合計として求まる。2013年当初の齢級別AR林累積面積は1 齢級が2008～2012年のAR林面積合計となり、2 齢級以降は2008年時の齢級別面積がそのまま繰り上がる。また第一約束期間の齢級別D林面積合計は、2008～2012年のD林面積を、1997年度「重要な林産物の需要および供給に関する長期

の見通し」のすう勢予測による2008～2012年の全国人工林齢級別伐採面積(森林基本計画研究会 1997)に比例配分して便宜的に求める。参考までに、このすう勢予測による第一約束期間の人工林主伐伐採量は、約48,000ha/年、1,500万m³/年となり、昨今の林業統計と比して妥当な予測値といえよう。

2.3. 蓄積変化法による炭素吸収量の計算

IPCC (2003) には、森林の炭素吸収量の計算方法として、デフォルト法と蓄積変化法の2つが挙げられているが、松本 (2005) によれば、我が国のように森林簿を吸収量算定の基礎資料として利用する場合には、後者の蓄積変化法を採用することが適当である。この場合の年あたり炭素吸収量は、2時点間の炭素蓄積量の差をその間の期間数で除したものとして計算される。

またIPCC (2003) では、森林における炭素プールとして、地上部バイオマス、地下部バイオマス、枯死木、リター、土壤有機物の5つを考慮することが求められている。本論ではAR・D林において、上記のうち地上部・地下部バイオマスのみを考慮し、林木の成長量を吸収に、主伐による伐採量を排出にそれぞれカウントする。またリターの一部である主伐時の林地残材は排出にカウントする。

上記AR林・D林の齢級別面積から地上部・地下部バイオマスの炭素蓄積量を求めるには、それら齢級別面積に、松本 (2001) の全国人工林齢級別平均蓄積 G_i (m³/ha),

$$[1] \quad G_i = 391.7e^{-5.986e^{-0.3272i}}, \quad R^2 = 0.998,$$

(ただし i : 齢級(1齢級=5年))

と齢級別針葉樹拡大係数 B_i ,

$$[2] \quad B_i = \frac{100}{90.748(1 - 0.37487e^{-0.25581i}) - 20.0}, \quad (R^2 \text{ 不明}),$$

さらには木材工業ハンドブック (林業試験場 1982) の針葉樹平均容積密度 $\rho=0.38$ (t/m³), IPCC (2003) の炭素含有率 $C=0.50$ をそれぞれ乗じる。こうして①2008年当初累積AR林, ②2013年当初累積AR林, ③2008～2012年合計D林の炭素蓄積量を求めたならば、第一約束期間の3条3項林地上部・地下部バイオマスの炭素吸収量は②-①-③となる。すなわち,

$$[3] \quad CS = \rho C \sum_i G_i B_i (ARA2013_i - ARA2008_i - DA_i)$$

(ただし CS: 第一約束期間の 3 条 3 項林地上部・地下部バイオマスの炭素吸収量(C-t), $ARA_{2008,i}$: i 年齢級の2008年当初累積AR林面積(ha), $ARA_{2013,i}$: 2013年当初の同面積(ha), DA_i : i 年齢級の2008~2012年合計D林面積(ha))

3. 結果と考察

3.1. 過去のAR・D林面積の推定値

1976~1994年のAR林, D林の推定結果を表1に示した. 1976~1994年のAR・D林面積はいずれも減少傾向を示した. AR林は1970年代の約60,000haから1990年代の約10,000haまで大きく減少したが, こうした新規造林面積の推移は, 昭和40年代をピークとした拡大造林面積の推移に強く影響を受けたと考えられる. D林は1970年代に約60,000haから30,000ha弱まで急激に減少した後, しばらく30,000ha前後で推移し, 1990年代に入ると20,000ha弱まで再び減少した. これは林地開発の減少を意味するが, 本質的には林業の衰退による伐採面積の減少と再造林放棄が相まって, 転出面積の減少として現れたものと推察

表1. 過去のAR・D林面積の推定値

年	AR林(ha)	D林(ha)
1976	61,880	59,670
1977	61,880	39,000
1978	61,880	30,420
1979	61,880	26,000
1980	61,880	25,220
1981	40,130	25,480
1982	40,130	30,810
1983	40,130	24,570
1984	25,100	31,850
1985	25,100	29,380
1986	21,900	26,650
1987	21,900	26,130
1988	21,900	29,120
1989	21,900	30,940
1990	11,640	27,950
1991	11,640	27,560
1992	11,640	29,250
1993	11,640	22,490
1994	11,640	16,380

注) 表中のすべての値は, 国土統計要覧(国土庁 1976-1994)と森林・林業統計要覧(林野庁 2005)より集計した転入・転出面積を, 林野庁内部資料により補正し, 筆者が独自に推定したもの.

される。またD林面積がAR林面積を上回るようになった1980年代を期に、3条3項林は炭素の吸収源から排出源に転換したことが示唆される。

3.2. 将来のAR・D林面積の予測値

表1のAR・D林面積に、多項式、対数、べき乗、指数など適当な減少関数を通常の最小二乗法で当てはめた結果、最も当てはまりが良かったものはそれぞれ以下のべき乗関数、対数関数であった。

$$[4] \quad \ln AR_t = \ln 125223 - 0.7018 \ln t, \quad R^2 = 0.747,$$

$$[5] \quad D_t = 55445 - 11747 \ln t, \quad R^2 = 0.706,$$

(ただし t ; 1975=1, 1976=2,...と定義された年次, AR_t : t 年のAR林面積 (ha), D_t : t 年のD林面積 (ha))

[4]式, [5]式による1995~2012年のAR・D林予測面積は表2のようになった。また過去の推定値と将来の予測値を合わせたAR・D林面積の推移を図1に示した。AR林, D林ともに、補正係数を介した推定値からモデルを介した予測値へと切り替わる1994年から1995年にかけて面積が約15,000ha, 約20,000haへとそれぞれ増加したが、その後は微減傾向を維持し、2012年には約10,000ha, 約13,000haとそれぞれなった。資料の不足により、これら予測結果の妥当性を十分に検証することはできないものの、2006年前後の予測値を見ると、AR林とD林を相殺した面積は5,000ha未滿で、これは極めて面積変化率の小さい、昨今の我が国の森林面積の現状と良く合っているようである。

そして1990~2012年のAR林面積の推定値・予測値から求めた第一約束期間前後の齢級別AR林累積面積は表3のようになった。AR林累積面積は、2008年当初には約220,000haとなり、2013年当初には第一約束期間中のAR林面積が上積みされて、約270,000haとなった。ここではAR林は第一約束期間終了まで伐採されないとの仮定に注意されたい。また第一約束期間中のD林面積合計は約67,000haとなった。第一約束期間の齢級別D林合計面積は表4のようになった。

表2. 将来のAR・D林面積の予測値

年	AR林(ha)	D林(ha)
1995	14,784	19,680
1996	14,309	19,134
1997	13,869	18,611
1998	13,461	18,111
1999	13,081	17,632
2000	12,726	17,171
2001	12,393	16,728
2002	12,081	16,301
2003	11,787	15,888
2004	11,510	15,490
2005	11,248	15,105
2006	11,000	14,732
2007	10,765	14,370
2008	10,542	14,020
2009	10,330	13,679
2010	10,128	13,348
2011	9,935	13,026
2012	9,750	12,713

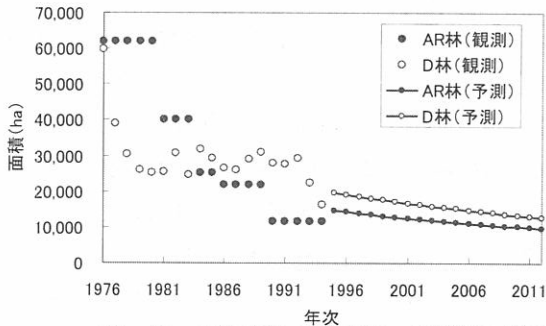


図1. AR・D林面積の推定値・予測値の推移
(凡例では便宜上、1976～1994年のAR・D林面積の推定値を「観測」と記した)

表3. 第一約束期間前後の累積AR林における炭素蓄積量計算のための諸要素

年齢級	AR林累積面積(ha)		幹材積 G_i (m^3/ha)	拡大係数 B_i	容積密度 ρ (t/m^3)	炭素含有率 C	炭素蓄積量($t-C$)	
	ARA 2008 _i	ARA 2013 _i					2008年当初	2013年当初
1	56,310	50,684	5.23	2.25	0.38	0.50	126,073	113,477
2	63,742	56,310	17.45	1.99			419,673	370,744
3	66,242	63,742	41.57	1.82			952,112	916,186
4	34,920	66,242	77.74	1.71			881,418	1,672,006
5		34,920	122.08	1.63			0	1,321,753
計	221,214	271,899				2,379,275	4,394,166	

表4. 第一約束期間のD林における炭素蓄積量計算のための諸要素

年齢	第一約束期間 人工林主伐面積 すう勢予測 (ha)	第一約束期間 D林合計面積 DA _i (ha)	幹材積 G _i (m ³ /ha)	拡大係数 B _i	容積密度 ρ (t/m ³)	炭素含有率 C	炭素蓄積量 (t-C)
1	0	0	5.23	2.25			0
2	0	0	17.45	1.99			0
3	0	0	41.57	1.82			0
4	405	112	77.74	1.71			2,830
5	1,572	435	122.08	1.63			16,455
6	4,781	1,322	169.02	1.58			66,960
7	10,908	3,017	213.70	1.54			188,225
8	23,362	6,461	253.07	1.51			468,185
9	37,389	10,340	285.88	1.48			833,974
10	47,332	13,090	312.14	1.47			1,139,744
11	41,614	11,509	332.56	1.46			1,058,376
12	22,892	6,331	348.10	1.45			605,360
13	9,021	2,495	359.75	1.44	0.38	0.50	245,282
14	8,681	2,401	368.40	1.43			240,742
15	7,634	2,111	374.76	1.43			214,717
16	6,688	1,849	379.41	1.42			189,976
17	5,500	1,521	382.80	1.42			157,357
18	4,323	1,196	385.26	1.42			124,295
19	4,480	1,239	387.05	1.42			129,262
20	2,739	757	388.34	1.42			79,226
21	1,277	353	389.28	1.42			37,000
22	600	166	389.95	1.42			17,399
23	213	59	390.44	1.42			6,192
24	55	15	390.79	1.41			1,605
25	26	7	391.04	1.41			766
計	241,493	66,786					5,823,929

3.3. 第一約束期間AR・D林の炭素吸収量

第一約束期間前後における累積AR林の炭素蓄積量の計算結果は表3のようになった。2008年当初の炭素蓄積量は約238万t-C、2013年当初は約439万t-Cとそれぞれなり、蓄積変化法により後者から前者を引いた約201万t-C(=約40万t-C/年)が第一約束期間における累積AR林の炭素吸収量となる。

同様に第一約束期間におけるD林合計の炭素蓄積量の計算結果は表4のようになった。D林の場合にはこの炭素蓄積量そのまま炭素排出量となり、その値は約582万t-C(=約116万t-C/年)であった。ただし、先にも述べたがこの予測排出量は、森林から他の土地利用への転出がすべて人工林で起きると仮定して計算した値であり、現実の排出量は、人工林より蓄積量の劣る天然林も転出に含むので、この予測値よりも小さくなると考えられる。

こうして第一約束期間の3条3項林地上部・地下部バイオマスの炭素吸収量は[3]式に従い、2013年当初累積AR林の炭素蓄積量－2008年当初累積AR林の炭素蓄積量－2008～2012年合計D林の炭素蓄積量=4,394,166－2,379,275－

5,823,929 $-$ 3,809,038 (t-C) $=$ $-$ 761,808 (t-C/年) となり, 約381万t-C (=約76万t-C/年) の排出と予測された. 1990年以降, 森林からの転出面積が転入面積を上回る予測下で, 3条3項林が炭素の排出源となることは必然といえよう. 過去の転入・転出面積を便宜的に推定している点, 転出元の森林を一律に人工林とみなしている点などから, この予測排出量は, 相応の不確実性を含むものである. しかしこうした不確実性を見込んだとしても3条3項林の排出量は, 我が国の炭素獲得量の上限值である1,300万t-C/年と比べるとわずかな量にとどまるであろう.

4. おわりに

本論の目的は, 2008~2012年の第一約束期間における京都議定書3条3項林の炭素吸収量を国レベルで予測することであった. はじめに1976~1994年以降の統計資料を用いて, 他の土地利用から森林への転入を新規植林・再植林 (AR), 森林から他の土地利用への転出を森林減少 (D) とそれぞれみなし, 統計資料に含まれない1ha未満の転出面積については林野庁の内部資料を用いて補正した. さらに毎年のAR・D林面積の推移の傾向を将来に延長するため, 適当な減少関数をあてはめて経年推移を外挿し, 1995~2012年の毎年のAR・D林面積を予測した. そして1990年以降の毎年のAR林面積から, 2008年当初および2013年当初の累積AR林面積の齢級配置を求めた. また2008~2012年の合計D林面積を, 「重要な林産物の需要および供給に関する長期の見通し」すう勢予測による2008~2012年の全国人工林齢級別伐採面積に比例配分して, この間の合計D林面積の齢級配置を求めた. これらAR・D林の齢級別面積に幹材積, 拡大係数, 容積密度, 炭素含有率を乗じて, これら森林の炭素蓄積量を求めた. 第一約束期間の3条3項林の炭素吸収量は, 蓄積変化法により, (2013年当初累積AR林の炭素蓄積量) $-$ (2008年当初累積AR林の炭素蓄積量) $-$ (2008~2012年合計D林の炭素蓄積量) として求められ, 計算の結果, 約381万t-C (=約76万t-C/年) の排出となった. しかしこの排出量は, 我が国の炭素獲得量の上限值である1,300万t-C/年と比べるとわずかな量である.

なお, 本研究は, 環境省・地球環境研究総合推進費B-60の補助を受けて実施された.

引用文献

- 栗屋善雄. 2005. リモートセンシング解析による森林変化. *森林技術* 754: 22-26
- 広嶋卓也. 2000. 森林セクター炭素収支モデルの開発. 天野正博編「人為活動による森林・木材分野の炭素収支変動評価」. 森林総合研究所. pp.24-28
- Hiroshima, T. 2004. Strategy for implementing silvicultural practices in Japanese plantation forests to meet a carbon sequestration goal. *J. of Forest Research* 9: 141-146
- 堀 修二・林 治克・天野正博ら. 2002. 衛星データを用いた京都議定書3条3項のARD抽出手法の開発. *森林航測* 197: 1-7
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Japan. 559p.
- 国土庁編. 1976-1995. 国土統計要覧. 大成出版, 東京. 518p.
- Lee, J.S., Yuki, H., Tsuyuki, S., Nakajima, T. and Hiroshima, T. 2005. Quantitative analysis of ARD occurrence area using prediction probability model, in Kyoto Protocol. In *The Role of Forests for Coming Generations - Philosophy and Technology for Forest Resource Management-*. Naito, K. (ed). Japan Society of Forest Planning Press. Tokyo. pp.405-416
- 松本光朗. 2001. 林業統計を利用した炭素蓄積量推定手法の改善. 天野正博・山形与志樹編. 「陸域生態系の吸収源機能に関する科学的評価についての研究の現状」国際ワークショップ報告書. 地球環境研究センター/国立環境研究所. pp.71-80
- 松本光朗. 2005. 京都議定書報告に向けた森林吸収量算定手法開発の取り組み. *森林技術* 754: 3-9

- Nakajima, T. and Hiroshima, T. 2005. The method of identifying forests under the Article 3.4 activities (FM forests), in Kyoto Protocol. In *The Role of Forests for Coming Generations -Philosophy and Technology for Forest Resource Management-*. Naito, K. (ed). Japan Society of Forest Planning Press. Tokyo. pp.369-378
- 中島 徹・広嶋卓也・天野正博. 2006. 京都議定書3条4項林の算定手法の検討—岐阜県を事例として—. *日林誌* 88: 181-186
- 林業試験場. 1982. 木材工業ハンドブック. 丸善. 東京. 1221p.
- 林野庁編. 2005. 森林・林業統計要覧時系列版 2005年版. 林野弘済会. 東京. 158p.
- 森林基本計画研究会. 1997. 21世紀を展望した森林・林業の長期ビジョン—持続可能な森林経営の推進—. 地球社. 東京. 416p.