

B-60 京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究

(1) 森林の炭素吸収量計測システム・評価モデルの開発

6) 国レベル森林吸収量評価モデルの開発

早稲田大学人間科学部

天野正博

東京大学大学院農学生命科学研究科 助手

広嶋卓也

<研究協力者>東京大学大学院農学生命科学研究科 大学院生 中島 徹

平成14～18年度合計予算額	79,322千円
(うち、平成18年度予算額	16,109千円)

※上記の予算額には、間接経費 18,157千円を含む

[要旨] 本研究の目的は、補助金、伐採量などの変動を見込んだ政策シナリオに応じて、2008～12年の第一約束期間に、京都議定書3条3項 (AR・D林) および4項 (FM林) に定められた人工林が、どの程度の炭素吸収を達成できるかを、国レベルで予測することである。はじめに森林と他の土地利用との間の転入・転出面積、育林補助金予算額、林業労働者平均賃金などの因子に対して、過去の傾向をもとにいくつかのシナリオを作成し、それらを回帰モデルへ入力して、第一約束期間までのAR・DおよびFM人工林面積を予測した。つぎにそれら人工林面積を資源管理モデルへ入力し、別途、第一約束期間の伐採量を予測することにより、第一約束期間期首および期末のAR・DおよびFM人工林における地上部、地下部バイオマス量を計算した。さらにそれらに容積密度、炭素含有率を乗じて炭素蓄積量に換算し、最後にそれらの第一約束期間期首、期末の差をとって、蓄積変化法により炭素吸収量を計算した。計算の結果、転入・転出面積の過去の傾向を延長すると、第一約束期間のAR・D林地地上部・地下部バイオマスの炭素吸収量は、約0.76Mt-C/年の排出と予測された (1Mt-C=1,000,000t-C)。また補助金や労賃といった林業活動に影響を与える因子が、若干の変動を含みつつも概ね過去の傾向を延長する形で推移したならば、FM人工林は第一約束期間に11.55～12.26 Mt-C/年の吸収量を獲得できると予測された。これはマラケシュ合意で上限を定められた炭素吸収目標値の約85%に相当し、FM天然林の吸収量を加味すれば吸収目標を達成する上で十分な量といえる。なお参考までに、2012年時に収量比数が0.85以下のFM人工林は、FM人工林全体の82%と予測され、10.40～10.81Mt-C/年の吸収量を第一約束期間に獲得できると予測された。これは炭素吸収目標値の約75%に相当し、この場合にはFM天然林の吸収量を十分に活用するとともに、第一約束期間終了まで、十分な育林補助金を計上すること、および壮齢～高齢の森林へ間伐や複層伐といった育林施業を実施する必要がある。

[キーワード] 京都議定書、第一約束期間、炭素吸収、3条3項、3条4項

注：なお、当研究は2つの機関で、「a. 国レベル森林の炭素吸収量モデルの開発」と「b. モデルに適用するパラメータの推定に関する研究」を行ったが、共同で調査、研究作業を行ったことから、報告書についても両機関の成果を統合して作成した。

1. はじめに

京都議定書によれば2008年から2012年の第一約束期間における国内森林吸収源は、3条3項林、すなわち1990年以降の新規植林（Afforestation: A）・再植林（Reforestation: R）・森林減少（Deforestation: D）と、3条4項林、すなわち1990年以降に森林経営（Forest Management: FM）の行われた森林からなる。

3条3項林について、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%に満たないことから⁷⁾、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。一方、3条4項林について、そこでの炭素吸収量は、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+13.0（Mt-C/年：1Mt-C=1,000,000t-C）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。林野庁によると3条4項林と考えられるのは、人工林に関しては、植栽・下刈り・除伐間伐等の森林施業を1990年以降に実施した森林、天然林に関しては、保安林等である。

また一般に、人工林は天然林と比して成長が旺盛であり、かつ成長量を含めた資源量の把握が容易であることから、炭素吸収の観点からは人工林の取り扱いが重要となる。

2. 研究目的

そこで本研究の目的は、育林補助金、伐採量などの変動を見込んだ政策シナリオに応じて、2008～12年の第一約束期間に、京都議定書3条3項（AR・D林）および4項（FM林）に定められた人工林が、どの程度の炭素吸収を達成できるかを、国レベルで予測することである。とりわけ全国規模での大々的なサンプリング調査や悉皆調査を行うことなく、既存の統計資料と数理モデルを用いて、炭素吸収量を予測することに力点を置く。

3. 研究方法

（1）フローチャート

図1に、本研究のフローチャートを示した。

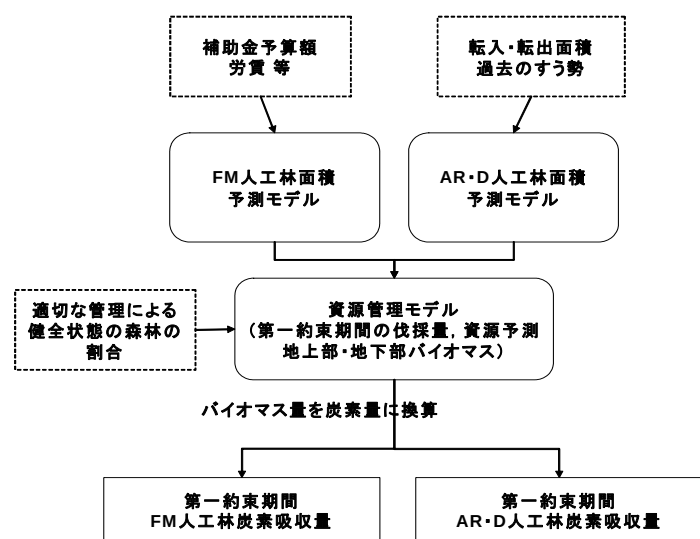


図1

図1. 本研究のフローチャート

はじめに補助金予算額、林業労働者平均賃金、転入・転出面積などの因子に対して、過去の傾向をもとにいくつかのシナリオを作成し、それらを回帰モデルへ入力して、第一約束期間までのAR・

DおよびFM人工林面積を予測する。つぎにそれら人工林面積を資源管理モデルへ入力し、別途、第一約束期間の伐採量を予測することにより、第一約束期間期首および期末のAR・DおよびFM人工林における地上部、地下部バイオマス量を計算する。さらにそれらに容積密度、炭素含有率を乗じて炭素蓄積量に換算し、最後にそれらの第一約束期間期首、期末の差をとって、蓄積変化法により炭素吸収量を計算する。

なおIPCC³⁾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、土壌有機物の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。

(2) AR・D林面積予測モデル

はじめに述べたように、我が国ではAR・D林はごくわずかであり、全森林の炭素収支に与える影響は小さい。そうした事情もあり、AR・D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^{1)、2)、6)}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。

林野庁によれば、3条3項の新規植林（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（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（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。

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、国土庁の国土統計要覧⁵⁾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。現実には民有林の大半をしめる零細林家の所有規模を考えれば、1ha未満の転出は無視できないと考えられるため、別途、1ha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、林野庁の林業統計要覧時系列版⁹⁾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（ $\therefore$ 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・農廃地から・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）。

こうして推定した、1976～1994年のAR林、D林の結果を表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。

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

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。

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以下のべき乗関数、対数関数であった。

$$[1] \quad \ln AR_t = \ln 125223 - 0.7018 \ln t, \quad R^2 = 0.747,$$

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

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)

[1]式、[2]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(●実線、○実線)を合わせたAR・D林面積の推移を図2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未満で、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。

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	14,308	19,134
1997	13,809	18,611
1998	13,461	18,111
1999	13,081	17,632
2000	12,728	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	13,028
2012	9,750	12,713

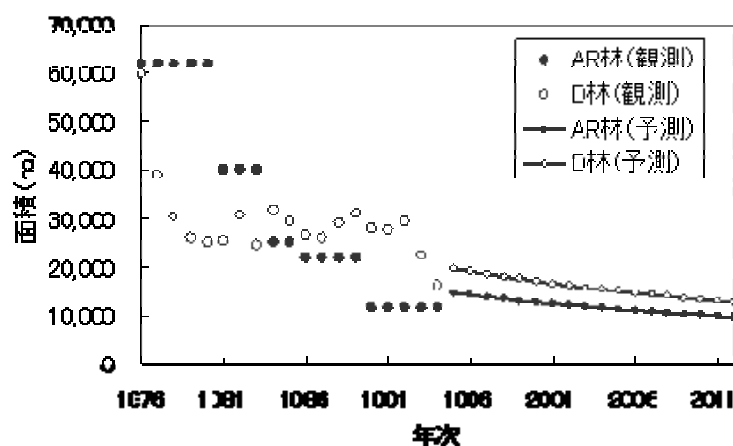


図2. AR・D林面積の推定値・予測値の推移

3) AR・D林の齢級別面積

さらに、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¹¹⁾に比例配分して便宜的に求める。この伐採面積は、後で述べる「資源管理モデル」で計算される。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。

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

期級	AR林累積面積(ha)		幹材量 G_1 (m ³ /ha)	植込係数 B_1	容積密度 ρ (t/m ³)	炭素含有率 C	炭素蓄積量(t-C)	
	ARA2008 _t	ARA2013 _t					2008年当期	2013年当期
1	66,310	66,004	623	226			126,073	113,477
2	63,742	66,310	1746	1.99			419,673	370,744
3	66,242	63,742	4157	1.82	0.38	0.60	962,112	916,186
4	34,920	66,242	77.74	1.71			891,418	1,672,006
5		34,920	122.08	1.63			0	1,321,763
計	221,214	271,899					2,379,276	4,394,106

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

期級	第一約束期間 人工林主伐開始 より経過年(ha)	第二約束期間 D林合計面積 (ha)	幹材量 G_1 (m ³ /ha)	植込係数 B_1	容積密度 ρ (t/m ³)	炭素含有率 C	炭素蓄積量 (t-C)
1	0	0	523	225			0
2	0	0	17.46	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			16,465
6	4,781	1,322	169.02	1.58			66,960
7	10,908	3,017	213.70	1.54			168,223
8	23,362	6,461	253.07	1.51			468,185
9	37,369	10,340	285.88	1.48			833,974
10	47,332	13,030	312.14	1.47			1,130,744
11	41,614	11,509	332.56	1.46			1,058,376
12	22,882	6,361	348.10	1.45			605,380
13	9,021	2,465	359.75	1.44	0.38	0.60	245,282
14	8,881	2,401	368.40	1.43			240,742
15	7,834	2,111	374.70	1.43			214,717
16	6,888	1,849	379.41	1.42			189,976
17	5,500	1,521	382.80	1.42			157,357
18	4,323	1,168	385.26	1.42			124,206
19	4,480	1,239	387.05	1.42			129,282
20	2,739	757	388.34	1.42			79,226
21	1,277	363	389.28	1.42			37,000
22	600	168	389.95	1.42			17,389
23	213	59	390.44	1.42			6,192
24	55	15	390.79	1.41			1,805
25	26	7	391.04	1.41			766
計	241,403	66,766					5,823,020

(3) FM林面積予測モデル

本研究で入手することの出来た森林施業情報は、民有人工林を対象とするものだけであったため、以下では主として全国の民有人工林におけるFM林を分析の対象とする。国有人工林に関しては結果・考察の章で、すべての森林をFM林と見なしうるとの単純な仮定をおいた上で、その炭素吸収量を計算するにとどめる。

1) 施業実施面積の予測

はじめに、1990～2001年までの年度別・施業種別・都道府県別の民有人工林施業実施面積の情報を林野庁より入手した。またこれら情報は公的補助金をうけて実施された施業とそうでないも

のに区別される。これら情報を施業種別・都道府県別に合計した上で、年度別かつ補助金の有無別に施業面積の推移を見ると、補助金の有無で施業実施状況には明確な違いが見られ、補助金ありの場合は年によらず概ね一定の施業面積を維持したのに対し（図3aの○）、補助金なしの場合は年とともに減少した（図3bの○）。

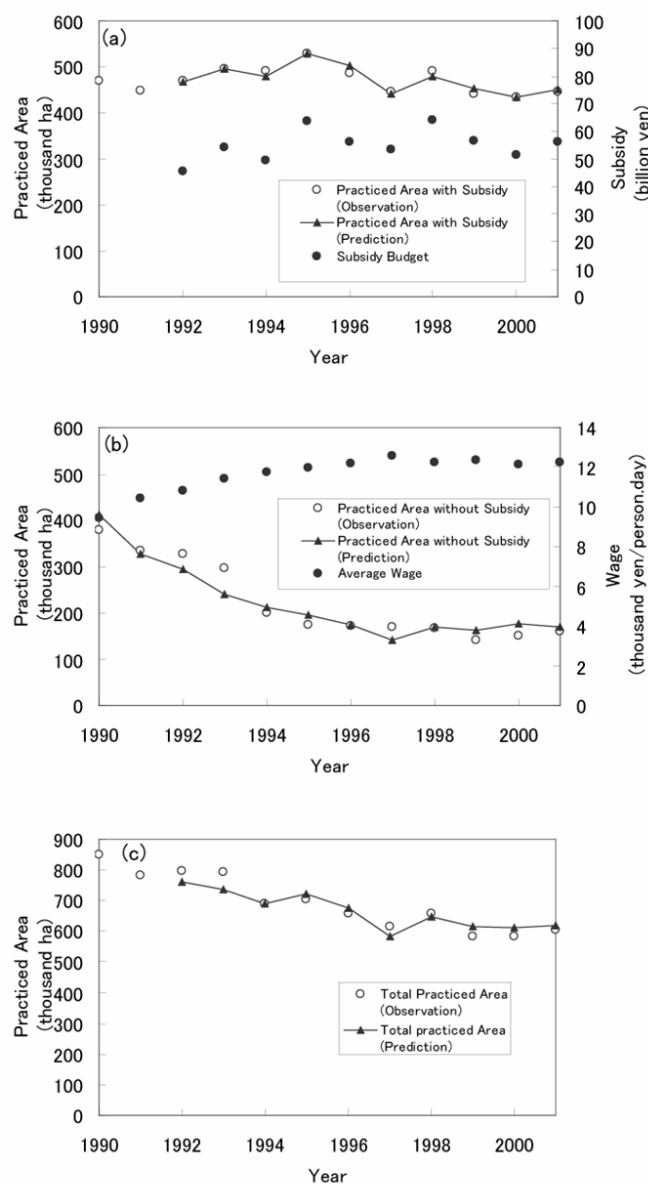


図3. 観測および予測された施業面積の比較（a：補助金あり、b：補助金なし、c：両者の合計）

つぎに全国で実施された施業面積を被説明変数、年度別の社会・経済的因子の変化を説明変数とする重回帰モデルを推定した。施業面積は、補助金ありとなしで傾向が異なるため、重回帰分析はこの2つを区別して行った。補助金ありの施業面積に関しては、1992～2001年の施業面積を被説明変数、年度別の補助金予算額（図3aの●）を説明変数として重回帰分析を行った。また1997年以降は補助金制度が再編されたためこの年を境に0から1へ変わるダミー変数も取り入れた。補助金なしの施業面積に関しては、1990～2001年までの施業面積を被説明変数、林業をとりまく社

会・経済的因子を説明変数として、用材需要量、林業労働者平均賃金（図3bの●）などを用意し、多重共線性を考慮して相関係数が0.4以上となる変数同士は同時に使用しない前提で、変数減少法による重回帰分析を行った。こうして推定した回帰式は以下の通りである。

$$[3] \quad PA1 = 312.900 + 3.37411S - 51.5420DM, \quad R^2 = 0.921670$$

$$[4] \quad PA2 = 1230.34 - 86.6029W, \quad R^2 = 0.904313$$

ただし、 $PA1$ ：補助金ありの年あたり施業面積（千ha）、 $PA2$ ：補助金なしの年あたり施業面積（千ha）、 S ：年あたりの補助金予算額（十億円）、 W ：林業労働者平均賃金（千円/人日）、 DM ：補助金ダミー。

$PA1$ 、 $PA2$ さらには両者の合計いずれも予測結果は良好であった（図3a、b、cの▲実線）。

つぎに2002年から2012年（第一約束期間の最終年）まで説明変数 S 、 W の推移について、いくつかのシナリオを設定することとし、補助金予算額については、過去10年間の傾向を延長して年6.64億円ずつ増加する場合、過去5年間の平均（563億円）を維持する場合、過去7年間の傾向を延長して年10.4億円ずつ減少する場合の3通り、林業労働者平均賃金については、過去14年間の傾向を延長して年162円ずつ増加する場合、過去5年間の平均（12,170円）を維持する場合、過去7年間の傾向を延長して年71円ずつ減少する場合をそれぞれ仮定した（図4a、bの▲実線）。

最後に、これらシナリオを3式、4式に与えて施業面積の推移を予測した。実際には全部で9通りのシナリオが存在するが、後の計算を簡単にするため、推進シナリオ（補助金増加かつ賃金減少）、現状維持シナリオ（補助金、賃金とも一定）、保守的シナリオ（補助金減少かつ賃金増加）の3通りのみを取り上げることとした。また施業面積予測値は、期待値の他に母集団の95%信頼区間をあわせて求めた。1990年から2001年の観測値と、2002年から2012年のこれら予測値を合わせることで必要となる施業面積が得られる。

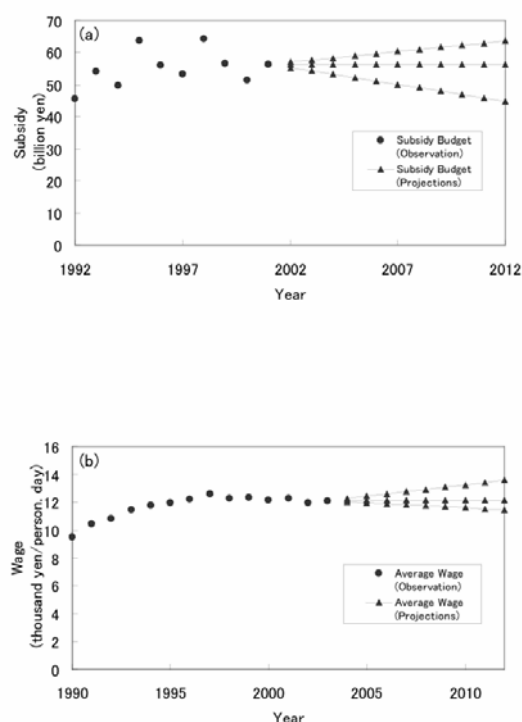


図4. 説明変数について仮定したシナリオ（a：造林補助金、b：林業労働者平均賃金）

図5は、2001年までの全国民有人工林における施業面積の観測値（●）と、2002年以降の推進、現状維持、保守的シナリオに応じた施業面積の予測値（▲実線）である。推進シナリオでは、施業面積は観測期間中の減少傾向から、増加傾向に転じた。現状維持シナリオでは予測値は、1997～2001年の移動平均の値をほぼそのまま維持し、保守的シナリオでは予測値は、観測期間中の減少傾向をそのまま延長した形となった。

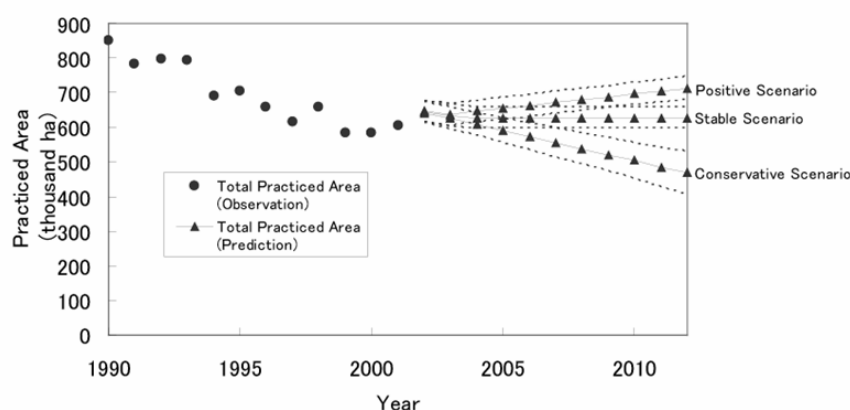


図5. 3つのシナリオに応じた全国民有人工林における施業面積の予測値（点線は95%信頼区間）

2) FM林面積の計算

上で観測・予測した23年間の施業面積は、同一林分に複数回実施された施業を重複して計上しているため、それら施業面積を単純に累積したものはFM林面積より過大となる。すなわちFM林面積を計算するには、施業の重複を除去して、施業面積に占めるFM林面積の割合（FM林算入率）を別途求める必要がある。昨年度までの研究で岐阜県民有人工林を対象に1990年～2000年までのFM林算入率を求めた結果が図6である。また2001年以降の算入率を予測するために、観測値に適当な非線形関数を当てはめると

$$[5] \quad r_{\text{year}} = 1.695 \times 10^{-6} e^{-8.251 \text{ year}} + 0.4073 e^{-0.005635 \text{ year}}, \quad R^2 = 0.8491$$

となった。

図6にこの式による予測の期待値（▲実線）とその信頼区間（点線）を合わせて示した。FM林算入率は施業の繰り返しを表す係数であるため結局は施業体系に起因するもので、岐阜県は他県と比

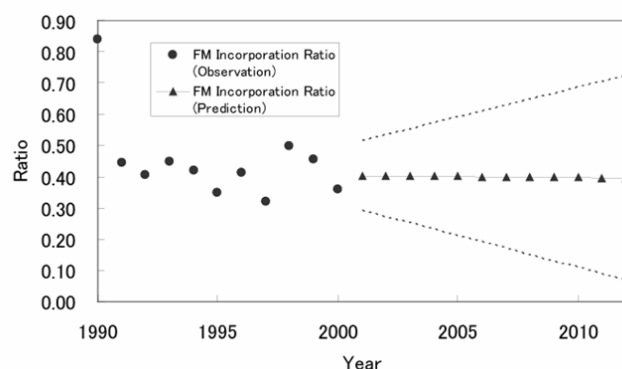


図6. 岐阜県民有人工林におけるFM林算入率の観測値と予測値（点線は95%信頼区間）

して一般的な施業体系を採用していることから、図6の算入率は広く全国に適用可能と考えられる。この算入率を先の施業面積に乘じることにより1990年～2012年のFM林面積が所与の推進、現状維持、保守的シナリオに応じて計算できる。

図7は、図5の施業面積と図6のFM林算入率を乗じて得られたFM民有人工林面積である。シナリオ別の予測値の傾向は図5と同様であるが、それらの信頼区間は図6のFM林算入率の影響を受けて年とともに広がった。1990～2012年のFM林累積面積を、期待値（95%信頼区間下限、95%信頼区間上限）の順に示すと、推進シナリオでは6,745,000（4,900,000、8,101,000）ha、現状維持シナリオでは6,557,000（4,839,000、8,101,000）ha、保守的シナリオでは6,232,000（4,722,000、7,841,000）haとなった。推進、現状維持シナリオの上限はいずれも8,101,000haとなったが、これは民有人工林のすべてがFM林となったことを表す。これらFM林の齢級別面積は紙面の都合上、省略するが各シナリオの期待値、信頼区間の上限、下限について計9通りの齢級構成が2008年と2013年それぞれで求められた。

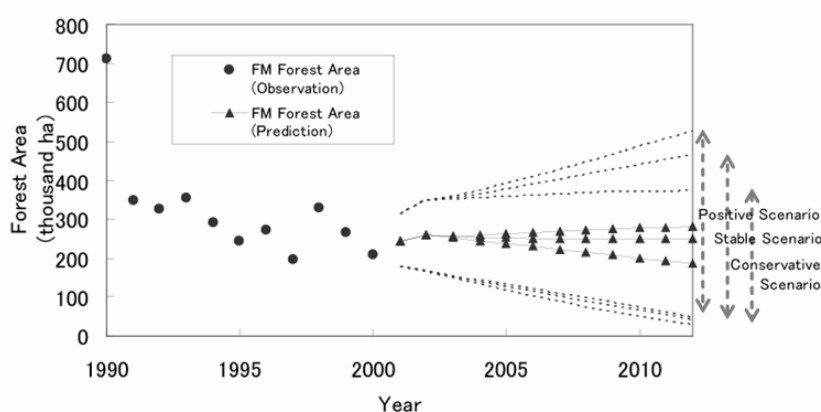


図7. 3つのシナリオに応じたFM民有人工林面積の予測値（点線は95%信頼区間）

3) FM林の齢級構成の特定

FM林の面積を炭素吸収量に換算するためには第一約束期間期首と期末のFM林齢級構成が必要となる。以下、その目的のために、林野庁による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年の間の民有人工林齢級別伐採面積、2013年当初の民有人工林齢級別面積の情報を援用することとする。これらはいずれも後に述べる「資源管理モデル」により計算される。2013年当初の民有人工林齢級別面積を便宜的に2012年期末のそれと見なすこととし、これに低齢級から順に1990～2012年のFM林合計面積を割り振ってゆく。「FM林面積率」を、対応する森林面積に占めるFM林面積の割合と定義すると、この割り振りの結果、2013年時のFM民有人工林のFM林面積率は、1齢級からある齢級*i*まではすべて1、*i*+1齢級で1未満、*i*+2齢級以上ですべて0となる。このようにFM林が低齢級に偏って存在することは岐阜県民有人工林の調査で明らかになっていることから（後出の図9）、この割り振りの方法は妥当といえよう。

また本研究では、2時期間の炭素蓄積量の差から炭素吸収量を求める「蓄積変化法」を採用するが、この方法で吸収量を計算する場合には、2013年時のFM林が、2008年時に既に存在したと見なして両者の蓄積の差を取る必要がある。そのため2008年時のFM林齢級構成は、2013年時の2齢級以上のFM林齢級別面積を1齢級ずつ繰り下げるにより求められる。さらに2013年時に1齢級とな

るFM林については別途、配慮が必要で、すなわち2008年時の非FM林に対して第一約束期間に伐採・再造林がなされ2013年にはFM林となった森林を、2008年時のFM林齢級構成に加える必要がある。それは2008～12年民有人工林齢級別伐採面積×(1-2013年齢級別FM林面積率)により求められる。

4) 収量比数0.85以下のFM林面積率

現在、林野庁ではFM林の概念をさらに厳密に解釈して、「適切な管理による健全状態の森林」と定義する動きがある。これは人工林の場合、立木密度の指標である収量比数（以下Ry）が0.85以下の状態にあることと定義される。本研究では参考のため、岐阜県民有人工林を対象に、このRy0.85以下のFM林面積率も推定する。

岐阜県の森林整備計画によれば、間伐率は、初回間伐が約20%、2回目が約30%と定められている。そこで岐阜県民有人工林におけるスギ・ヒノキ人工林を対象に、15年生時に初回20%、20年生時に2回目 30%の間伐を想定し、さらに1990年以降、1回間伐もしくは2回間伐を受けたFM林の割合を伊藤らの研究⁴⁾を参考にそれぞれ約3割、7割と仮定した上で、システム収穫表LYCS¹²⁾を用いて、樹種別・間伐回数別にRyが0.85以上となる林齢を求めた（スギ：1回間伐のみでは7齢級・2回間伐では10齢級、ヒノキ：1回間伐のみでは9齢級・2回間伐では15齢級）。その結果、2012年時点ですでにFM林となった森林のうち82%がRy0.85以下となった。すなわちこの場合のFM林面積を求めるには、2) で予測した1990～2012年のFM林合計面積に0.82を乗じたものを、2013年当初の民有人工林齢級別面積に、低齢級から順に割り振ってゆけばよい。

（4）資源管理モデル

資源管理モデル（図8）は、素材価格を媒介として国産材の需給量の均衡をはかるもので、供給量（図8左側）に関しては、まず素材価格、林道開設延長、素材生産費指数を説明変数とする回帰式にもとづき経済林率を計算した後に、経済林に対する減反率計算により伐採面積が、それに収穫表の材積を乗じて伐採材積がそれぞれ求められ、さらにそれに各種歩留まりを乗じて素材量を求める。また図8では省略されているが、また需要量（図8右側）は、新規住宅着工量、住宅木造率、各種価格指数などからなる14個の説明変数をもつ構造方程式により、製材用材、合板、その他木質パネルの3分類で求められる。モデルの詳細については、森林計画研究会¹⁰⁾、森林基本計画研究会¹¹⁾を参照されたい。このモデルはとくに供給量を求める過程で人工林の資源管理のみを内生的に取り扱うため（天然林からの供給量は年次のみを説明変数に持つ単回帰式により外生的に求められる）、森林部門では天然林は炭素量計算の対象外とする。

（5）バイオマス量の炭素量への変換

こうして求めたAR・DおよびFM林齢級別面積に、全国人工林齢級別蓄積 G_i 、

$$[6] \quad G_i = 391.7e^{-5.986e^{-0.3272i}}, \quad R^2 = 0.998$$

齢級別針葉樹拡大係数 B_i 、

$$[7] \quad B_i = \frac{100}{90.748(1 - 0.37487e^{-0.25581i}) - 20.0}, \quad (R^2 \text{ 不明})$$

さらには木材工業ハンドブック⁸⁾の針葉樹平均容積密度 $\rho = 0.38 \text{ (t/m}^3\text{)}$ 、IPCC³⁾の炭素含有率 $C = 0.50$ をそれぞれ乗じて2013年と2008年の炭素蓄積量を計算し、それらの差を取ることで第一約束期間におけるAR・DおよびFM民有人工林炭素吸収量が計算できる。

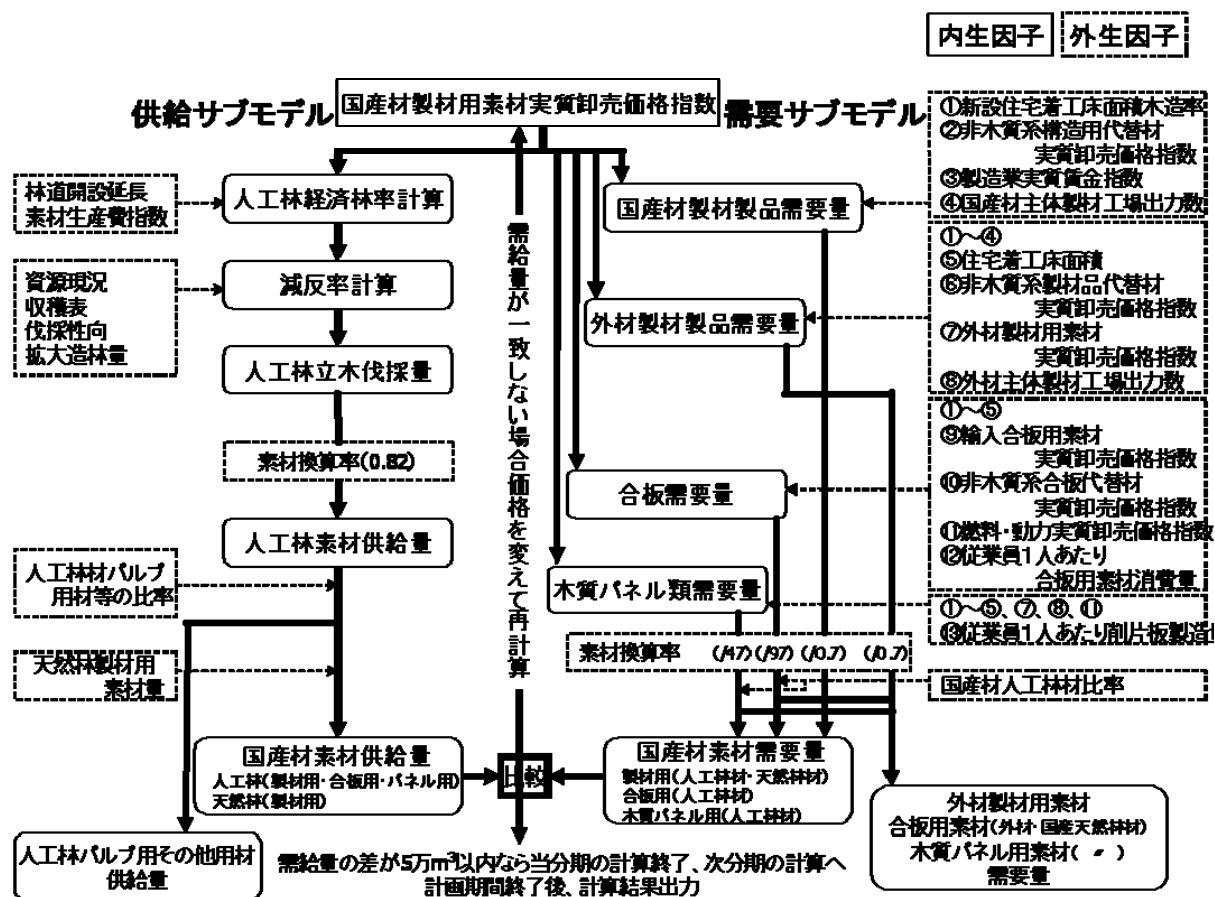


図8. 資源管理モデルの構造

4. 結果・考察

(1) 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前出の表3のようになった。2008年当初の炭素蓄積量は約2.38Mt-C、2013年当初は約4.39Mt-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2.01Mt-C（=約0.40Mt-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前出の表4のようになった。D林の場合にはこの炭素蓄積量がそのまま炭素排出量となり、その値は約5.82Mt-C（=約1.16Mt-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、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3.81Mt-C（=約0.76Mt-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値である13.0Mt-C/年と比べるとわずかな量にとどまるであろう。

(2) 第一約束期間FM林の炭素吸収量

1990～2012年のFM林累積面積は、期待値（95%信頼区間下限、95%信頼区間上限）の順に示すと、先に述べたように年度別施業面積の推定と年度別FM林算入率の推定から、年度別FM林面積を計算すると推進シナリオでは6,745,000（4,900,000、8,101,000）ha、現状維持シナリオでは6,557,000（4,839,000、8,101,000）ha、保守的シナリオでは6,232,000（4,722,000、7,841,000）haとなった。このFM林の地上部・地下部バイオマスの炭素吸収量および伐採に伴う炭素排出量を〔6〕、〔7〕式と図8に示した資源管理モデルを用いて算出すると、第一約束期間におけるFM民有人工林の炭素吸収量は、推進シナリオでは8.87（6.15、10.63）Mt-C/年、現状維持シナリオでは8.61（6.05、10.63）Mt-C/年、保守的シナリオでは8.16（5.85、10.30）Mt-C/年となった（カッコ内は95%信頼区間の下限と上限）。

この予測吸収量の意味するところについて以下、考察を加える。はじめに述べたようにわが国の森林吸収源における炭素吸収目標は13.0 Mt-C/年であり、3条3項林は約0.76 Mt-C/年の排出源と予測されることから、実質的にはFM林が13.76 Mt-C以上の吸収量を獲得することが必要とされ、さらに人工林の吸収量は天然林を上回ること、そもそも天然林の吸収量を正確に算定することは困難であることから炭素吸収の観点からはFM人工林が重要となる。また人工林の中では民有林が総面積の77%を占めることから、結局、FM民有人工林が13.76 Mt-Cの吸収量の大半を獲得することが求められる。上記予測によれば、伐採量が現状程度（人工林全体で主間伐合計素材生産量が1,800万m³程度）の場合、補助金や労賃といった林業活動に影響を与える因子が、若干の変動を含みつつも概ね過去の傾向を延長する形で推移したならば、FM民有人工林は第一約束期間に8.16～8.87 Mt-C/年の吸収量を獲得できると思われる。この獲得量は13.76Mtの吸収目標の59～64%にあたる。このパーセンテージが十分なものであるか否か、判断するために以下、FM国有人工林の炭素吸収量を簡単に計算する。「林産物需給の長期見通し」によれば国有人工林の総面積は241万haで、それらの齢級構成や齢級別伐採面積は民有人工林と同様に予測されている。これを利用して、「FM林面積率」がすべての齢級で1と仮定して上記と同様の方法により計算すると、国有人工林の炭素吸収量は第一約束期間に3.39 Mt-C/年となり、これは13.76 Mtの吸収目標の25%にあたる。この25%という数値は過大推定だとしても、一般に国有林のFM林面積率は民有林よりは高いことを考えれば、民国合わせることにより、FM人工林だけで吸収目標の概ね85%は獲得できることと予想される。FM天然林の吸収量に加わることを考えれば、FM民有人工林の59～64%の獲得量は、目標達成の上で十分といえよう。ただしこの数値は予測の期待値であることに注意する必要がある。

予測誤差を楽観的に見積もるならば、推進・現状維持シナリオの信頼区間上限に見られるように民有人工林のすべてがFM林になると見なして、FM民有人工林は10.63 Mt-Cの炭素を吸収することができる。この場合にはFM民有人工林だけで目標値の77%を達成することになり、国有林を加えればFM人工林だけで目標値を達成できよう。しかしこれを実現するには、FM林算入率が過去の減少傾向に反して予測期間に0.7程度まで上昇する必要があることから、現実味は乏しい。

保守的シナリオの信頼区間下限ではFM民有人工林は5.85 Mt-Cの炭素しか吸収できない。これは予測誤差を最も悲観的に見積もった場合で、補助金が毎年減額され続け、労賃は予想以上に上昇

し、施業が特定の林分にばかり繰り返行われてFM林算入率が急激に低減するような場合である。この場合には目標値の45%しか獲得できないため、FM国有人工林やFM天然林がポテンシャルに近い吸収を発揮しても、目標の達成は困難であろう。

なお参考までに、3. (3) 4) で述べた収量比数0.85以下のFM林に限定した場合、第一約束期間におけるFM民有人工林の吸収量は、推進シナリオでは7.42 (4.65、 8.73) Mt-C/年、現状維持シナリオでは7.27 (4.57、 8.73) Mt-C/年、保守的シナリオでは7.01 (4.41、 8.43) Mt-C/年となった。上述したとおり、FM林のおよそ8割がRy0.85以下であったことを受け、炭素吸収量も本節はじめの値のおよそ8割となった。この期待値ベースで7.01～7.42 Mt-C/年の獲得量は13.76Mtの吸収目標の51～54%にあたる。この場合、民国合わせるとFM人工林は吸収目標の概ね75%を獲得できると予想され、FM天然林の吸収量を十分に活用する必要があるだろう。

最後に民有林・国有林を合わせたFM人工林全体の予測結果を表5にまとめた。

以上のように、FM民有人工林が第一約束期間に8.16～8.87 Mt-C/年 (Ry0.85以下の場合、7.01～7.42 Mt-C/年) の吸収量を獲得するためには、以下の2つの林業政策が望まれる。1つめは、これまでと同等かそれ以上の育林補助金を第一約束期間終了まで計上し続けることで、これが叶わなければ、年ごとの施業面積は図5に示された保守的シナリオに近づくかそれを下回ることになりかねない。2つめは、1990年以降に育林施業が十分に行われていなかった森林に、施業を実施することで、これが叶わなければ、FM林算入率は図6に示された信頼区間の下限近くまで低下しかねない。図9に示したように、5齢級以上の人工林には未だ施業実施する余地が多分に残されているため、壮齢～高齢級を対象とした間伐や複層伐を実施することが重要となろう。これらの政策が実行に移されなければ、炭素吸収目標の達成は不透明なものとなる。

表5. FM人工林における推進・現状維持・保守的の3つのシナリオに応じた予測結果

	推進シナリオ			現状維持シナリオ			保守的シナリオ		
	下限値	期待値	上限値	下限値	期待値	上限値	下限値	期待値	上限値
1990～2012年の 施業面積累計 (千ha)	17,785	18,133	18,481	17,313	17,660	18,008	16,368	16,844	17,320
1990～2012年の FM林面積累計 (千ha)	7,315	9,160	10,516	7,254	8,972	10,516	7,137	8,646	10,255
うちRy≤0.85	6,433	7,946	9,058	6,383	7,791	9,058	6,287	7,525	8,844
2008～2012年の 炭素吸収量 (Mt-C/年)	9.54	12.26	14.02	9.44	12.00	14.02	9.24	11.55	13.69
うちRy≤0.85	8.04	10.81	12.12	7.96	10.66	12.12	7.80	10.40	11.82

注：下限値と上限値は、予測値の95%信頼区間の下限と上限を表す。

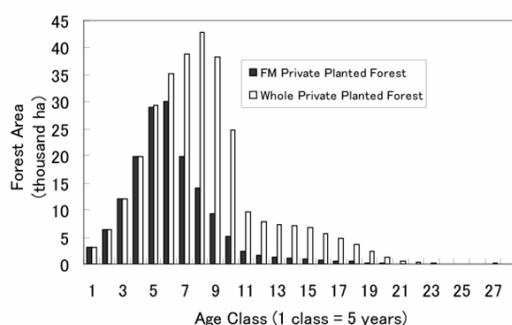


図9. 2000年時の岐阜県民有人工林とそこでのFM林の齢級構成

5. 本研究により得られた成果

育林施業の補助金や林業労働者の労賃といった林業活動に影響を与える因子が、若干の変動を含みつつも概ね過去の傾向を延長する形で推移したならば、FM人工林は第一約束期間に、マラケシュ合意で上限を定められた炭素吸収目標値の約85%を獲得すると予測され、FM天然林の吸収量を加味すれば吸収目標を達成する上で十分な量といえる。参考までに、FM林を収量比数0.85以下のものに限定した場合、FM人工林は第一約束期間に吸収目標の約75%を獲得すると予想され、この場合にはFM天然林の吸収量を十分に活用するとともに、第一約束期間終了まで、十分な補助金を計上すること、および壮齢～高齢の森林へ間伐や複層伐といった育林施業を実施する必要があるだろう。

(1) 科学的意義

本研究では、実地でのサンプリング調査、悉皆調査などを行うことなく、既存の統計資料と数理モデルを活用して、コンピュータシミュレーションにより京都議定書3条3項林（AR・D林）、3条4項林（FM林）の炭素吸収量を予測した。こうした独自の方法により推定した炭素吸収量は、生態学的プロセスモデルや全国規模のサンプリングといった、その他の方法により推定した炭素吸収量とのクロスチェックに利用可能で、その科学的意義は深いといえる。

(2) 地球環境政策への貢献

数理モデルを活用したシミュレーションにより、とくに育林施業の補助金政策が炭素吸収量にあたる影響を明らかにした。またマラケシュ合意で定められた炭素吸収目標を達成する上で有効となる、補助金政策や育林施業のあり方について提言した。これらは今後の林業政策のひとつの指針となりうる。

当研究の遂行途中で得られた成果をリアルタイムで政策に反映するため、環境省地球環境局「森林等の吸収源に関するワーキンググループ」検討会や「温室効果ガス排出量算定方法検討会：森林等の吸収源分科会」に委員として係わり、京都議定書における吸収源の取り扱いに関する国際交渉の進展に合わせて知見を提供するとともに、京都議定書で認められた吸収源活動に伴う炭素吸収量を国連に報告するための算定方法に情報を提供するなどして、地球環境政策に貢献した。また、LULUCF-GPGにReview Editorとして参画するとともに、COP、SBSTA、UNFCCC主催のワークショップでも研究成果を紹介してきた。

6. 引用文献

- 1) 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
- 2) 堀修二・林治克・天野正博・松本光朗・栗屋善雄（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.
- 3) 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
- 4) 伊藤奈々恵、広嶋卓也、白石則彦（2005）森林の施業実施に影響を与える因子とその分析—岐阜県を対象として．森林計画誌39：49－57.
- 5) 国土庁 編（1976-1995）国土統計要覧．大成出版、東京．
- 6) 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 Kenji Naito (eds) The Role of Forests for Coming Generations -Philosophy and Technology for Forest Resource Management-, Japan Society of Forest Planning Press, Tokyo. 405-416.
- 7) 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.
- 8) 林業試験場 (1982) 木材工業ハンドブック、丸善、東京
- 9) 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
- 10) 森林計画研究会 (1987) 新たな森林・林業の長期ビジョン. 地球社、東京
- 11) 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ー持続可能な森林経営の推進ー. 地球社、東京.
- 12) 白石則彦 (1986) 同齢単純林の成長予測に関する研究. 東大演報75: 199-256.

7. 国際共同研究等の状況

米国のシンクタンク「Resources for the Future」と京都議定書吸収源の扱いについて共同研究を実施した。先方のカウンターパートとしてRoger Sedjo上級研究員が対応し、成果をRFFペーパーとして公表した。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) Sedjo, R. A., M. Amano & Y. Yamagata: 森林総合研究所研究報告、Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute, 1, 2(383), 151-161(2002)
 “The operationalization of the Kyoto Protocol with a focus on sinks: A perspective for Japan”
- 2) 天野正博: 日本土壌肥科学雑誌、74, 4, 543-549(2003)
 「地球温暖化が農林生態系に及ぼす影響ー森林生態系と地球温暖化の関係ー」
- 3) 瀬戸島政博、今井靖晃、船橋学、岡崎亮太、天野正博: ランドスケープ研究、66, 5, 503-508(2003)
 「落葉前後の航空機レーザースキャナデータを用いた里山の樹高計測と落葉広葉樹の林分把握に関する基礎的検討」
- 4) T. Hiroshima: J. For. Res., 9, 2, 141-146 (2004)
 “Strategy for implementing silvicultural practices in Japanese plantation forests to meet a carbon sequestration goal”
- 5) T. Nakajima, T. Hiroshima, JS. Lee, H. Yuki and S. Tsuyuki: Kenji Naito (eds) International Symposium on The Role of Forests for Coming Generations -Philosophy and Technology for Forest Resource Management-, Japan Society of Forest Planning Press, Tokyo, 369-378 (2005)
 “A method of identifying forests under the Article 3.4 activities (FM forests), in Kyoto Protocol”
- 6) 伊藤奈々恵、広嶋卓也、白石則彦: 森林計画誌、39, 1, 49-57 (2005)
 “森林の施業実施に影響を与える因子とその分析ー岐阜県を対象として”
- 7) 中島徹、広嶋卓也: 林業経済、58, 8, 18-21 (2005)

“森林整備事業と施業面積に関する分析”

- 8) 瀬戸島政博、今井靖晃、天野正博：写真測量とリモートセンシング、44, 2, 43-53 (2005)
「落葉前後に観測した航空機レーザスキャナによるDSMを用いた落葉広葉樹林内の階層構造の把握」
- 9) 天野正博：ランドスケープ研究、68, 4, 324-326 (2005)
“地球温暖化の軽減に資する緑の計画・管理技術”
- 10) 中島徹、広嶋卓也、天野正博：日林誌、88, 181-186 (2006)
“京都議定書3条4項林の算定手法の検討ー岐阜県を事例としてー”
- 11) T. Hiroshima and T. Nakajima: J. For. Res., 11, 6, 427-437 (2006)
“Estimation of sequestered carbon in Article-3.4 private planted forests in the first commitment period in Japan”
- 12) Masahiro Amano and Roger A. Sedjo: RFF Reports, 59pp (2006)
“Forest Sequestration: Performance in Selected Countries in the Kyoto Period and the Potential Role of Sequestration in Post-Kyoto Agreements”
- 13) 広嶋卓也：森林資源管理と数理モデルVol.6, 129-140 (2007)
“京都議定書報告のための国家森林資源データベースの開発”
- 14) 中島徹、広嶋卓也、白石則彦：日林誌、89, 167-173 (2007)
“京都議定書・3条4項林面積の拡大を視野に入れた森林施業の実施面積に関する分析”（印刷中）

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 天野正博：山林、1435, 2-10 (2003)
「京都議定書に沿った二酸化炭素吸収源としての森林の役割」
- 2) 天野正博：森林環境2004、築地書館、43-51 (2004)
「日本の森林のCO₂吸収量」
- 3) T. Hiroshima: Int. For. Rev., 7, 102 (2005)
“Impacts of forestry policy on carbon sequestration in Japanese plantation forests”
- 4) 中島徹、広嶋卓也、白石則彦、柴田彩子、鞍打大輔、竹内美次：日林関東支論、56, 65-66 (2005) “京都議定書CO₂吸収源としての保安林に関する研究ー山梨県早川町での検討ー”
- 5) 天野正博：写真測量とリモートセンシング、44, 6, 7-9 (2005)
「京都議定書からみたLIDARによる森林計測への期待」
- 6) Roger A. Sedjo and Masahiro Amano: Resources, 162, 19-22 (2006)
“The Role of Forest Sinks in a Post-Kyoto World”
- 7) Masahiro Amano & Naoko Tsukada: Second Informal Dialogue on the Role of Land Use, Land Use Change and Forestry in the Climate Change Response, Ministry of Environment, Spain, 161-171 (2006)
“Promotion of Sustainable Forest Management under Climate Change Regime”
- 8) 天野正博：環境ボランティア、WAVOC, 12-16 (2006)
「地球環境と環境ボランティア」

- 9) 天野正博：炭素循環および温室効果ガス観測ワークショップ講演要旨集、地球環境研究センター、国立環境研究所、95-98(2006)

「京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究」

- 10) 中島徹、広嶋卓也：日林北海道支論，54，110-111（2006）

“北海道民有林における森林施業の実態分析－京都議定書・森林吸収量の推定を視野に入れて－”

（２）口頭発表（学会）

- 1) 広嶋卓也、伊藤奈々恵、天野正博：日本林学会114（2003）

「第一約束期間における3条4項対象森林の炭素吸収量評価」（アブストラクト提出済み）

- 2) 中島徹、広嶋卓也：日本林学会115（2004）

「京都議定書3条4項における森林面積の算定に関する研究」（アブストラクト提出済み）

- 3) T. Nakajima and T. Hiroshima: International Symposium on The Role of Forests for Coming Generations -Philosophy and Technology for Forest Resource Management-（2004）

“The method of identifying forests under the Article 3.4 activities (FM forests) in Kyoto Protocol”（アブストラクト提出済み）

- 4) 中島徹、広嶋卓也、白石則彦、柴田彩子、鞍打大輔、竹内美次：日本林学会関東支部56（2004）

「京都議定書CO2吸収源としての保安林に関する研究－山梨県早川町での検討－」（アブストラクト提出済み）

- 5) 中島徹、廣嶋卓也、白石則彦：日本森林学会116（2005）

「施業面積の拡張に関する政策因子とその分析－国レベルの施業実施状況推定モデルの開発－」（アブストラクト提出済み）

- 6) 中島徹、広嶋卓也、露木聡、白石則彦：日本森林学会関西支部56（2005）

「森林簿における小班面積の精度に関する研究－三重県・岐阜県での検討－」

- 7) 中島徹、広嶋卓也：日本森林学会北海道支部54（2005）

「北海道民有林における森林施業の実態分析」

- 8) T. Hiroshima: 22nd IUFRO World Congress（2005）

“Impacts of forestry policy on carbon sequestration in Japanese plantation forests”

- 9) 広嶋卓也・中島徹：森林資源管理と数理モデル-FORMATH KYUSYU 2006-（2006）

「第一約束期間における3条3項・4項人工林の炭素吸収量の試算」

（３）出願特許

なし

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

（５）マスコミ等への公表・報道等

なし