

平成10年度
研究発表会要旨集

平成10年10月14日（水）
東京・石垣記念ホール

農林水産省 林野庁
森林総合研究所

正誤表

	誤	正
P.4 下から5行目	0.7 Gt	0.7 Gt / 年
P.4 下から4行目	1.6 Gt	1.6Gt / 年
P.10 図の説明	(C _t : 炭素換算量)	(C トン : 炭素換算量)
P.10 図中	約 1 1 億トン	約 1 1 億 C トン
P.11 3行目	1.4 ~ 10.4	1.4 ~ 10.4 t / (ha・年)
P.11 表1	年成長 T/ha	年成長 t/ha
P.25 11行目	二酸化濃度	二酸化炭素濃度
P.27 2, 3行目	木造炭素固定量 0.05 t-C/m ² = 489 万 t-C	木造炭素固定量 炭素固定量 0.05 t-C/m ² = 489 万 t-C
P.28 5行目	489 万 t-C	346 万 t-C

単位換算表

1 Gt (ギガトン) = 1×10^9 t = 10 億トン

1 Mg (メガグラム) = 1 t = 1 トン

「1 t C」=「1 C トン」=「1 t-C」 : 1 トンの炭素

目 次

1.地球温暖化における森林の役割	
林業経営部 資源計画科長 天野 正博	2
2.森林樹木の炭素固定能力をどう捉えるか	
森林環境部 植物生態科長 埴田 宏	7
3.炭素を封じ込める森林土壌の働き	
森林環境部 立地環境科長 太田 誠一	13
4.熱帯林における炭素の蓄積と二酸化炭素の出入り	
ー推定法の現状と課題ー	
生産技術部 物質生産研究室長 石塚 森吉	19
5.地球温暖化から見た木材利用	
木材利用部 物性研究室長 外崎真理雄	25

地球温暖化における森林の役割

林業経営部 資源計画科長 天野 正博

1. はじめに

森林は大気中の炭素を光合成によって吸収し、バイオマスとして蓄積するため、温室効果ガスを吸収する有力な生物的手段と考えられている。昨年12月に京都で開催された気候変動枠組み条約第3回締約国会議（COP3）でも、森林の炭素吸収機能を議定書の中でどう取り扱うか議論された。もっとも、現段階では森林が吸収している大気中の炭素量よりも、森林の消失や森林火災によって排出される炭素量の方が優っており、世界の森林全体としては排出源になっている。しかし、森林の消失のほとんどは熱帯地域であり、COP3で定められた京都議定書において「附属書1の締約国」と呼ばれる温室効果ガスの数量的な排出抑制を受ける温・亜寒帯の国々では、森林蓄積が増加傾向にあって大気中の炭素の吸収に貢献している。従って、附属書1の締約国の多くは、森林の有する大気中の炭素吸収量を排出削減目標値と絡めて評価することに関心を持っていた。森林部門が地球温暖化の軽減に貢献する方法全体を考えるのであれば以下の四つがあり、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第2次報告書では適切な手段を採用すれば、今後50年間に森林部門で60～90Gtの炭素を吸収し貯蔵することができるとしている。

(1) 森林バイオマスの蓄積を増加させる。

森林は大気中の二酸化炭素と地中の水分を光合成によってバイオマス量に変換している。従って、高蓄積の森林を作り上げることにより、森林生態系内に大量の炭素を固定することができる。

(2) 長期的に使用する木材製品を増加させる。

森林を伐採しても木材として利用することにより、森林が大気中から吸収した炭素を再び大気中に放出する時期を延ばすことができる。法隆寺などの古い木造建築は千数百年の間、炭素を木材中に閉じこめている。

(3) 炭素の排出を削減するため、木材で他の原材料を代替させる。

木材を原材料として用いると、鉄やアルミを原材料として用いるのに比べ、製造過程で排出される炭素量は格段に少なくなる。例えば、木製のサッシを製造する場合、アルミサッシを製造するのに比べ炭素の排出量は1/10ですむ。

(4) 森林バイオマスをエネルギーとして使用し、化石燃料の使用を節約する。

世界の工業国のエネルギー源は大多数が石油や石炭といった化石燃料である。こうした化石燃料を使用して炭素を一旦大気中に放出すれば、それを再度大気から回収するには多額の経費がかかる。一方、森林は大気中の二酸化炭素を吸収して生長するので、森林バイオマスエネルギー源として利用すれば、大気と森林の間で炭素が循環するだけですみ、バイオマスエネルギーとして利用した分だけ、地中に化石燃料として貯えられている化石燃料を大気中に放出せずにすむ。

こうした森林の働きをわが国の森林・住宅部門で発揮させようとする、図1のような流れが考えられる。なお、京都議定書では(1)のうち、1990年以降に植林された森林について、限定的に取り上げて評価をしようとしている。

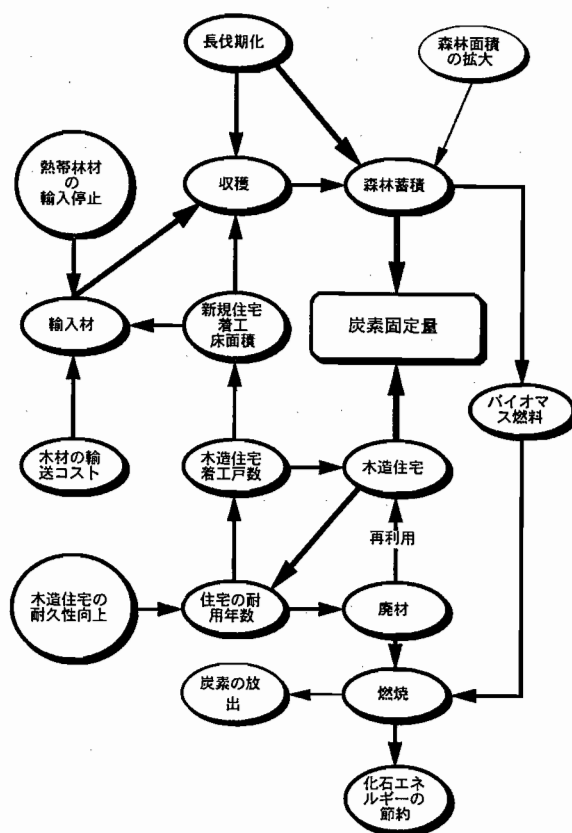


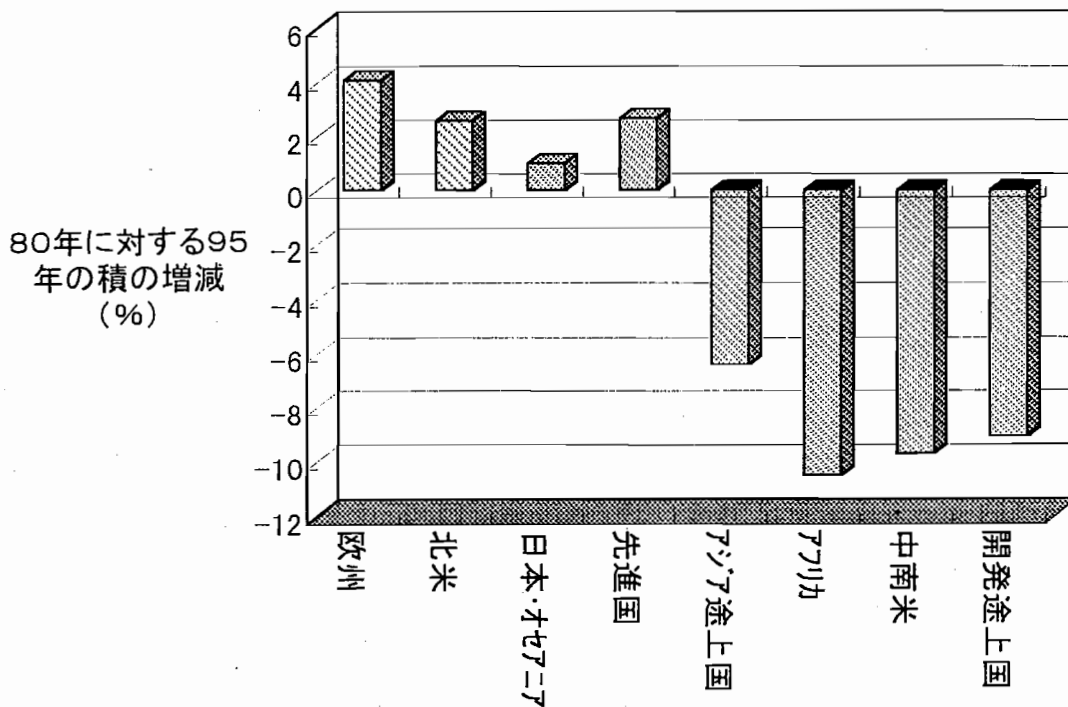
図 1. 森林セクターにおける炭素固定の概略

2. 森林と地球温暖化に関わる国際的な取り組みの流れ

まず、世界の森林資源の変遷について概観してみる。かつては陸域の半分近い約60億haが森林に覆われていたといわれ、文明の発展とともに森林は減少し続けている。例えば、米国の西部開拓は森林を農地に変える形で進み、現在は南部の綿花畑やアパラチアン山系の生産性の低い農地が森林に戻されつつある。オーストラリア、ニュージーランドも同様に、森林を伐採し広大な農地を作り上げた。ヨーロッパでは産業革命時に石炭へ移行する以前にエネルギー源として薪炭材を用いた結果、大多数の森林が破壊された。現在のヨーロッパの多くの森林は、いったん破壊された後に人為によって回復されてきたものである。このように、温帯地域では20億ha近い森林が文明の進展に伴って消失したが、現在は回復時期にあるといえる。一方、英国の東インド会社による東南アジアでのチークの伐採など、植民地経営の中で熱帯林の商業伐採が始まっていたものの、熱帯林は比較的最近まで温存されてきた。しかし第2次大戦後になると、ほとんどの熱帯地域で大規模な森林資源開発が行われたことと、この地域での人口増加、経済発展により熱帯林は急速に姿を消しつつある。

IPCC第1次報告書では、1980年前後には年間1100万ha前後とされていた熱帯林の消失面積が、1990年には年間1540万haに増加していることに注目していた。最近のFAOの統計（FAO, 1997）によれば、1990年から1995年までの熱帯地域における年平均の森林減少面積は1259万haになったことから、森林の減少速度は一時ほどではないものの、依然としてわが国の森林面積の半分近くが年々地球上から消えている。

1990年の森林面積は34億haで、そのうち16億4000万haが温・亜寒帯林、17億6000万haが熱帯林である（FAO, 1997）。森林バイオマスとして330GtCを貯蔵し、森林土壌中には660GtCが貯えられていると推定され、この量は大気中の炭素を上回る。もっとも、森林と大気間での炭素収支をみると、温・亜寒帯の森林によって 0.7GtC/年 の炭素を吸収しているものの、熱帯地域における森林の消失や森林火災によって 1.6GtC/年 の炭素を排出しており、先に述べたように森林全体としては排出源になっている（IPCC, 1995）。近年の世界の森林資源の増減をFAOの統計で見ると、図2のようである。



※FAO、State of the World's Forestより作成

図2. 1980年と1995年での森林面積の比較

3. 森林・住宅部門が固定している炭素蓄積量の評価

各国とも、COP3で定められた削減目標を達成するため、森林が吸収する炭素量に大きな関心を抱いている。わが国においても森林・住宅部門の炭素量的の評価に関する研究を進めているので、その概要を報告する。

森林資源及び建造物に固定されている炭素を推定するモデルを開発し、現在から将来に至る森林蓄積の推移、住宅に称されている木材ストックの推移を調べた。モデルでは、①現状維持、②国産材をある程度に振興、③国産材を積極的に振興、④長伐期という四つの政策シナリオを用いた。各シナリオに基づいて森林が管理されると、森林セクターに蓄積される炭素量は図3のようになる。炭素の固定のみに焦点を当てれば長伐期シナリオが望ましく、国産材の生産量増大を目指せば、国産材の積極的な振興政策が望ましい。ただ、後者は将来において森林における炭素貯蔵量を減少させることから、環境面も配慮すれば両者の中間的な位置づけになっている、国産材をある程度に振興させる政策シナリオが望ましい。

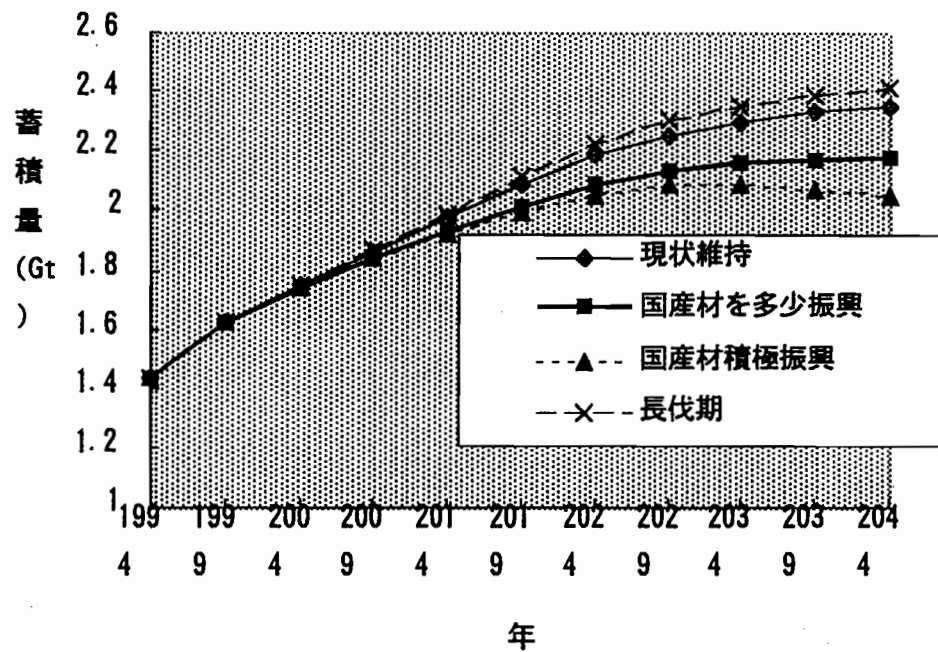


図3. シナリオ別に予測した森林内への炭素蓄積量

参考文献

- 1) FAO, 1997, State of the World's Forest, FAO
- 2) IPCC, 1995, Climate Change 1995 -Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press

森林樹木の炭素固定能力をどう捉えるか

森林環境部 植物生態科長 埴田 宏

1. はじめに

森林には大気中の二酸化炭素（CO₂）を吸収し、酸素を放出する働きがある。これは植物による光合成の働きであるが、植物も呼吸をすることにより二酸化炭素を放出しているので、正味の二酸化炭素吸収量は光合成量と呼吸量の差である純生産量の大きさで決まる。

$$\text{純生産量} = \text{総生産量（光合成量）} - \text{呼吸量}$$

さらに、動物によって葉や幹が食べられた量と落葉などの枯死量を差し引いたものが植物群落の正味成長量となる。1年間の土地面積当たり正味成長量は、土地の生産力（気候条件や土壌の養分量で決まる）が同じであれば、葉の光エネルギー利用量に比例する。森林や農耕地では植物体の一部または全部が収穫物として外へ持ち出されるので、収穫量を差し引く。

$$\text{森林（植物群落）の正味成長量} = \text{純生産量} - \text{被食量} - \text{枯死量} - \text{林産物の収穫量}$$

森林全体が蓄積している炭素量とは、上式の正味成長量の累計（植物の現存量）と森林に住む動物、菌類を合わせた総量（生物体量、バイオマス）に含まれる炭素の他、落葉などの生物遺骸、土壌中の炭素を合わせたものである。

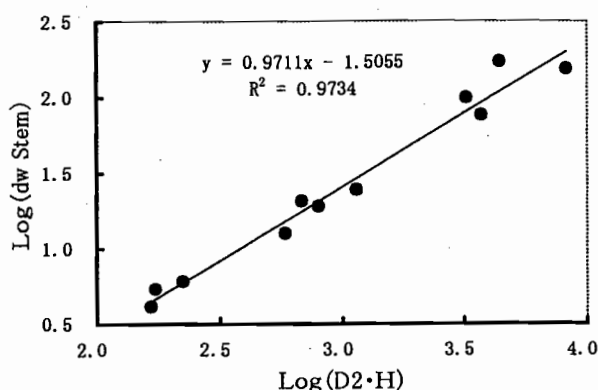
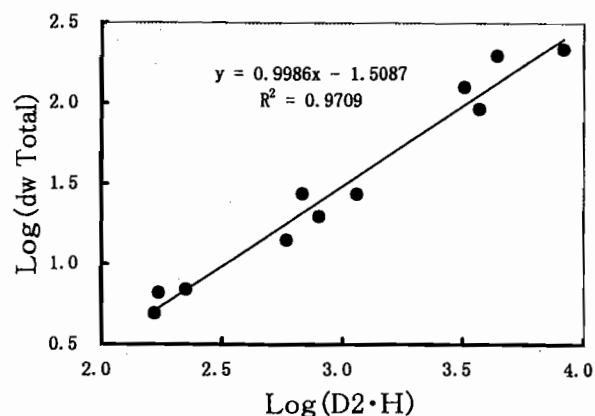
$$\text{森林の炭素量} = \text{バイオマス（植物＋動物＋菌類）中の炭素} + \text{生物遺骸中の炭素} + \text{土壌炭素}$$

森林のバイオマス総量では植物（樹木）の量が圧倒的に多く、50年生のスギ林では200～300t/haになり、約半分が炭素の重量である。生物遺骸と土壌炭素は、合わせて、100～300t/haと推定される。

2. 森林の現存量の測定

森林の二酸化炭素吸収量を正確に推定するためには、まず、森林の生産力を測定する。正味成長量は森林が1年間、1 ha当たり増加させた現存量で、これを生産力とする。生産力の測定については、1960年代のIBP（国際生物学事業計画）の研究によって多くの成果が得られている。大型の樹木からなる森林の総重量を測定するのは困難であるが、樹木の各器官（幹、枝、葉など）の重量が両対数グラフ上で直線関係にあること（相対成長関係）を利用できる。実際に、ある林分の単位面積当たりの総重量を測定するには次のような手順を取る：

- (1) 0.05～0.1 haの面積内にあるすべての樹木について、その大きさ（胸高直径、樹高）を測定する（毎木調査）。
- (2) 平均値と分散が母集団と同じになるよう、様々な大きさの標本木を10数本選び、伐倒して1～2 mの高さ別に切り分け、さらに器官別に分類して重量を測定する。
- (3) 各器官の一部を持ち帰り、乾燥させて重量を測定、生重との比（乾重率）を係数として全体の乾燥重量を計算する。
- (4) 幹の大きさ（体積）を表す D^2H と幹、枝、葉等の器官別重量の対数値から一次回帰式を得る（図1、2にコジイ天然林での測定例を示す）。
- (5) 毎木調査の結果に回帰式をあてはめ、器官別重量、個体重量、林分合計値を得る。

図1. D^2H と幹重量の関係図2. D^2H と葉重量の関係

(1) FAO(1995) State of the World's Forest の公表値

合 計： $1498 \times 10^6 \text{ t}$ (幹のみ)

(2) 1997年版林業統計要覧の蓄積より幹、枝、葉、根の乾燥重量合計を推定

針葉樹林： $1379 \times 10^6 \text{ t}$

広葉樹林： $990 \times 10^6 \text{ t}$

合 計： $2370 \times 10^6 \text{ t}$

この推定は、根（地下部）まで含めた現存量が測定された研究報告により、全樹種込みで林分総材積と総重量の一次相関関係（図3）を適用して求めたが、重量の大部分を占める幹の乾燥重量を容積重から計算したものより、やや大きくなる。林業統計要覧による森林蓄積（材積）の増加と伐採収穫による減少量を森林生態系内の物質循環に位置づけ、図4に示した。

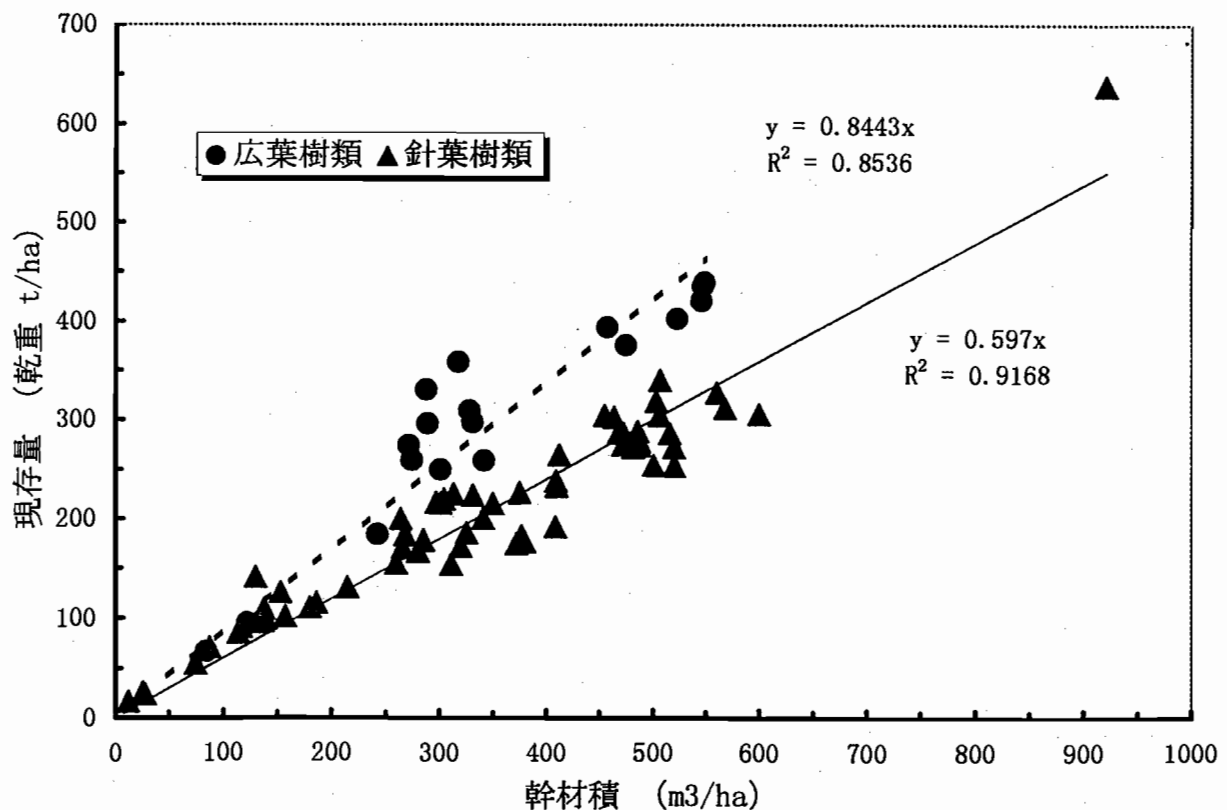


図3. 林分総材積と現存量の関係

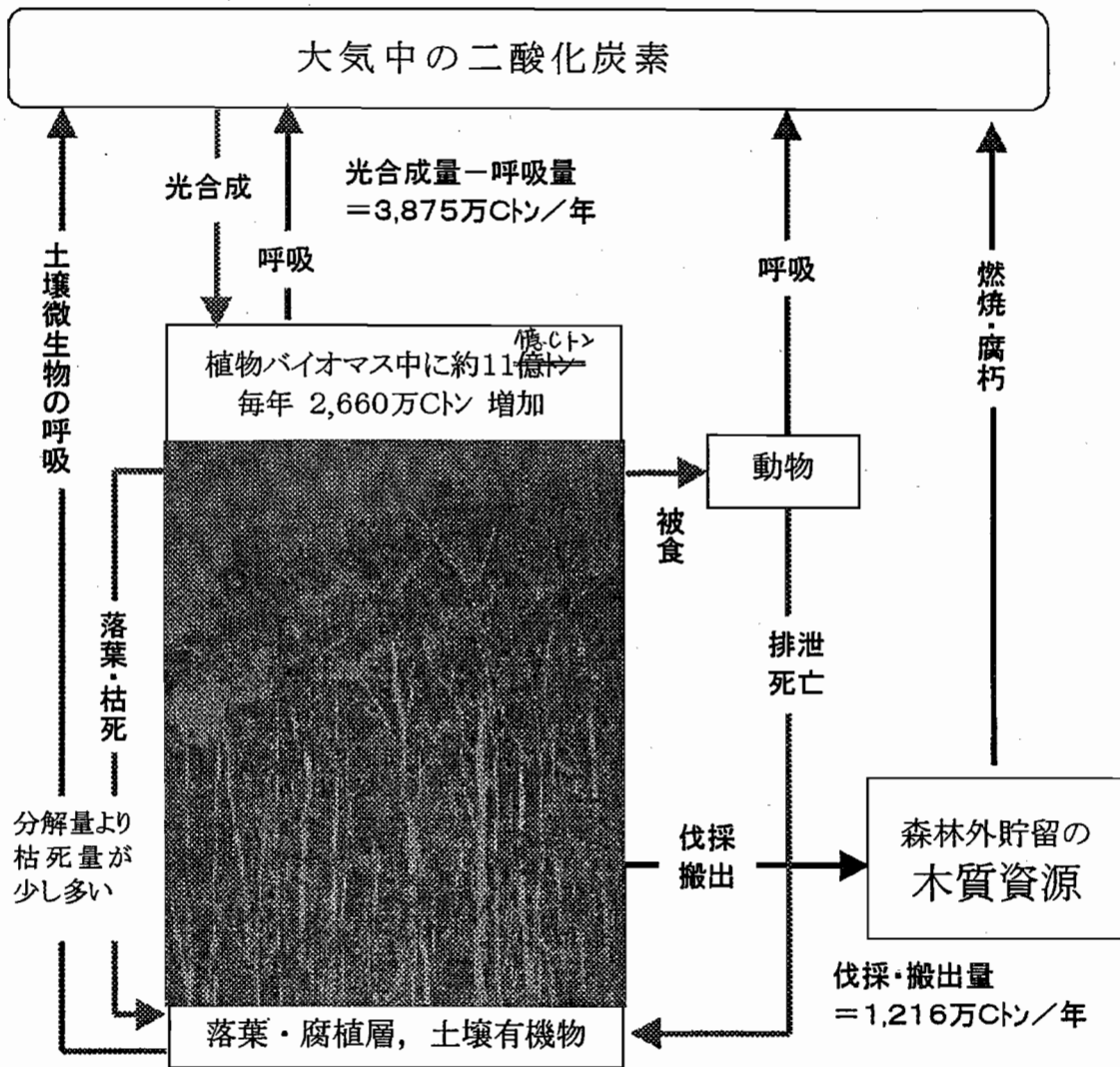


図4. 森林生態系の炭素の流れ
(Cトン: 炭素換算量)

3. 日本の森林の二酸化炭素吸収量

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）で用いられる計算式は

$$\text{二酸化炭素吸収量} = \sum (\text{森林面積} \times \text{面積当たりバイオマス成長量}) \times \text{換算係数}$$

(二酸化炭素への換算係数は $0.5 \times 44/12$ とする)

面積当たりのバイオマス成長量は森林植物の正味成長量が使用され、森林のタイプ（樹種、林齢、土地条件で区分）によって異なる数値が用いられる。これまでの研究結果では、樹種による違いは少なく、 $10 \sim 29 \text{ t/ (ha} \cdot \text{年)}$ とされている。この値は

相当良好な林分が選ばれた結果であり、広く適用すると過大となる。また、葉、枝、根の部分は伐採時に林地に残され、腐朽により二酸化炭素を放出するため、吸収量から差し引かれる。幹の増分だけで吸収量を計算すると、スギでは1.4~10.4^{t/(ha・年)}の範囲にあり、平均で5.9t/(ha・年)となる。

せき悪地等を含めた平均的な吸収量を推定するため、「林野庁：酸性雨等森林被害モニタリング事業」の第1期（1990～1994）調査データから林種別に樹幹材積の平均成長量（林分材積／林齢）を計算し、優占種の気乾比重を乗じて乾燥重量を求めた。この調査は、全国1134箇所から地域の代表的林分を選んで測定点とし、特別な施業を行っていないため、欧米の国家森林資源調査に近い条件下のデータが得られている。結果は表1に示すとおり、樹種別の平均成長量（林分材積／林齢）の範囲は研究報告と大差ないが、最頻値は低めである。なお、樹種によって平均成長量や最多成長量が異なるのは、生育場所の立地条件を反映しているためであり、樹種の特性ではない。例えば、スギはヒノキよりも肥沃な立地条件の場所に植えられているためにスギ林の成長がよいのであって、ヒノキの適地に植えたスギの成長はよくない。

ある時点の現存量が正確に測定できていれば、現存量の差から二酸化炭素の吸収量を推定することができる。持続可能な森林経営に関するモントリオール・プロセスの基準5「地球的炭素循環への森林寄与の維持」で用いられる指標はこの考えに基づいている。

表1. 樹種毎に幹の成長量から計算したha当たり年間バイオマス成長

		平均成長量			バイオマス換算			適用
		面積 千ha	範囲 m³/ha	最多 m³/ha	適用 容積重	年成長 T/ha	総量 千t/yr	年成長 t/ha
温帯林		18,500					57,016	3.1
人工林	小計	8,758					30,899	3.5
	スギ	4,508	4-20	10.0	0.38	3.8	17,130	3.8
	ヒノキ	2,396	4-12	7.8	0.41	3.2	7,662	3.2
	アカマツ・クロマツ	1,024	3-12	5.6	0.53	3.0	3,039	3.0
	カラマツ	606	4-12	7.0	0.53	3.7	2,248	3.7
	その他針	65	4-10	6.0	0.51	3.1	199	3.1
	広葉樹	159	4-16	6.0	0.65	3.9	620	3.9
天然林	小計	9,742					26,117	2.7
	針葉樹	1,712	4-10	6.0	0.51	3.1	5,239	3.1
	広葉樹	8,030	4-16	4.0	0.65	2.6	20,878	2.6
北方林		5,090					14,378	2.8
人工林	小計	1,455					4,632	3.2
	エゾマツ・トマツ	896	4-11	7.0	0.42	2.9	2,634	2.9
	カラマツ	471	4-12	7.0	0.53	3.7	1,747	3.7
	その他針	47	4-10	6.0	0.51	3.1	144	3.1
	広葉樹	41	4-16	4.0	0.65	2.6	107	2.6
天然林	小計	3,635					9,746	2.7
	針葉樹	641	4-10	6.0	0.51	3.1	1,961	3.1
	広葉樹	2,994	4-16	4.0	0.65	2.6	7,784	2.6
全国計		23,590					71,394	3.0

*バイオマス成長量の係数は、樹種別の材積成長最頻値を1990年の森林統計に入れ、バイオマス重量に換算したもののから、林種（人工・天然）別の係数を求めた（加重平均）。この値には落葉等のリターとして堆積、土壌中に蓄積される量を含まない。

4. 今後のデータ収集

あらゆるタイプの森林を系統的に調査対象とする国家森林資源調査が行われれば、根系、土壌中の炭素量を含めて、森林が蓄積している炭素量とその動態を明らかにすることは困難ではない。森林のタイプ別に二酸化炭素吸収量が把握できれば、吸収量を増加させる対策も可能であろう。あわせて、森林から都市域へ材木やパルプとして移動したバイオマス量とその寿命に関する調査を行うことが必要である。また、木質資源のリサイクル率の向上やバイオマス燃料の使用によって化石燃料消費を減少させることも重要である。

参考文献

Cannell, M.G.R. (1982) World Forest Biomass and Primary Production Data, p.93-185. Academic Press, London

吉良竜夫（1976）陸上生態系. 生態学講座 2 : 1-166, 共立出版.

只木良也・蜂屋欣二（1968）森林生態系とその物質生産. わかりやすい林業研究解説シリーズNo.29, pp.64, 林業科学振興所, 東京.

佐藤大七郎（1973）陸上植物群落の物質生産Ⅰa. 生態学講座 5 a : 1-95, 共立出版.

埜田宏（1996）基準5：地球的炭素循環への森林寄与の維持. 森林科学 16:66.

堤利夫（編）（1989）森林生態学, pp.166, 朝倉書店

炭素を封じ込める森林土壌の働き

森林環境部 立地環境科長 太田 誠一

1. はじめに

化石燃料の大量消費の結果、大気中の二酸化炭素濃度の上昇に伴う地球温暖化の進行が危惧されている。地球規模の炭素循環の詳細は必ずしも十分に理解されていないが、陸上生態系はその大気中の約3倍に相当する2兆500億tの炭素を貯留し、このうち62%が陸地面積の約30%を占めるに過ぎない森林に貯留されている。さらに、そのうち60%強は土壌中に存在すると考えられているので、地球上の陸上生態系に貯留される炭素の実に40%弱が森林土壌中に存在している計算になる（図1）。

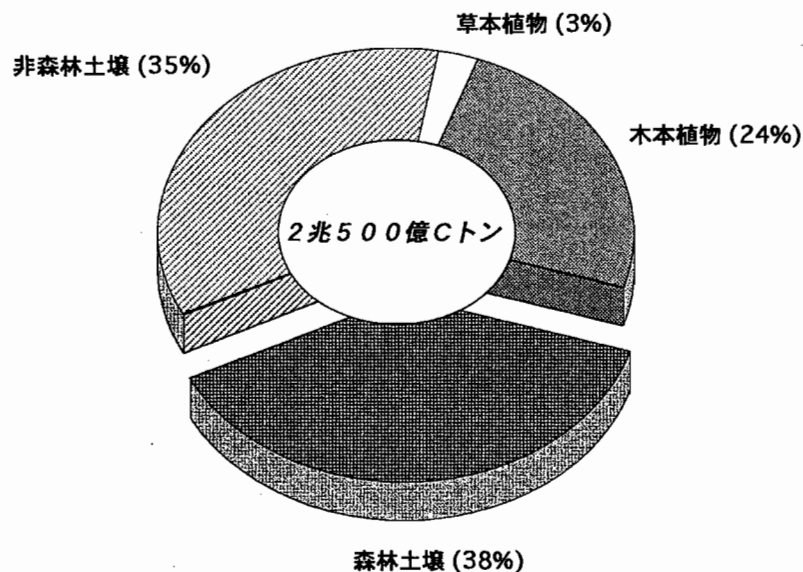


図1. 地球上の陸上生態系における炭素分布

このように、森林土壌は地球の炭素プールの中で重要な位置を占めているが、一方で土壌中の有機炭素は人為や環境インパクトに伴って変化することが知られている。わが国の森林生態系において、将来、温暖化などの環境変化や森林管理に対し、巨大な炭素プールである森林土壌中の炭素がどのように応答するかを予測し、また、森林土壌の炭素貯留機能を最大限に発揮させるため、土壌炭素の動態を広

域・長期で明らかにすることが必要になっている。このため、わが国森林土壌中に貯留される炭素量とその分布様式を把握し、炭素貯留の支配要因に基づいた立地区分を行うことが求められている。本研究は、既往の土壌調査データを収集・整理し、これに基づきわが国森林土壌における炭素貯留量の試算を行ったものである。

2. 多様なわが国の森林土壌と炭素含有率

わが国には多様な自然環境を反映し、様々な森林土壌が分布している（図2）。最も広く見られるのは褐色森林土で、わが国森林の70%以上がこの土壌で覆われ、次いで火山放出物を材料にした黒色土の分布が広い。またこれら以外にも、若い火山放出物などからなる未熟土や、高標高地には次表層が溶脱したポドソル、本州の一部や南西諸島などには赤黄色土なども分布している。これらの森林土壌ではその炭素含有率もそれぞれに異なっている（図3）。黒色土では有機物がアルミニウムと強く結合し安定化するため、炭素含有率が高い。褐色森林土の炭素含有率は中程度である。褐色森林土は分布する位置によって、斜面上部から下部にかけて乾性、適潤性及び湿性褐色森林土に細分されるが、一般に表層土壌の炭素含有率は乾性に比べ適潤タイプで高い傾向にある。一方、赤黄色土、未熟土などの炭素含有率は他に比べてはるかに低い。また、ポドソルは独特で溶脱層には炭素を含まず表層と下層にだけ炭素が分布している。

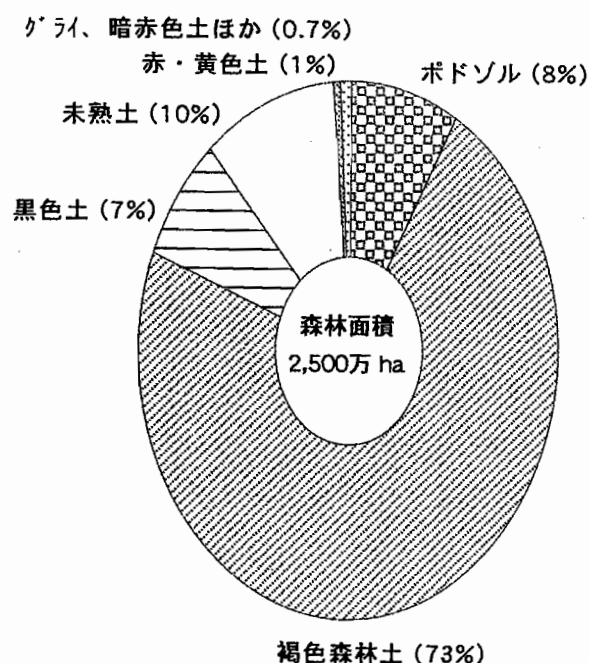


図2. わが国における森林土壌の分布割合

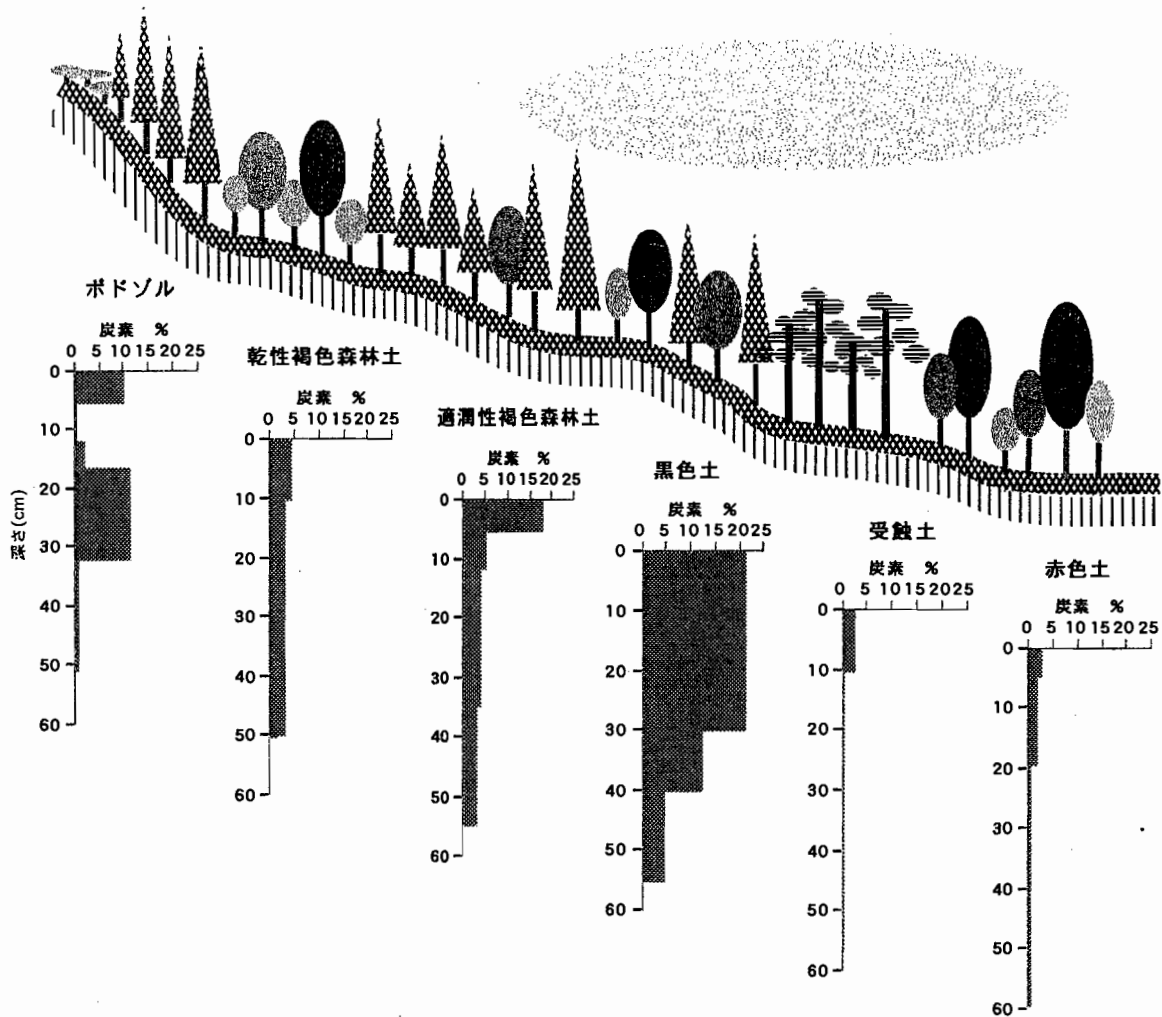


図3. わが国の森林土壌とその炭素含有率の例

3. 炭素貯留量の推定方法

土壌中の炭素貯留量の推定は、各土壌層位中の炭素貯留量（炭素含有率（％）×層位の厚さ×容積重）を深さ方向に積算し、その深さとの関係を累乗式によって近似し、これに基づいて任意の深さでの貯留量を求める方法によって行った。昭和38年から42年にかけて全国で実施された「林地土壌生産力研究」の810土壌断面についての、深さと積算炭素量の関係を土壌型毎に示したものが図4である。得られた近似式に基づいて推定した深さ100cmまでのha当たりの炭素貯留量は「乾性褐色森林土」と「適潤性褐色森林土」で約200t、「湿性褐色森林土」では、これよりやや多い245tであるのに対し、火山灰母材の「黒色土」では、315tに達した（図5）。

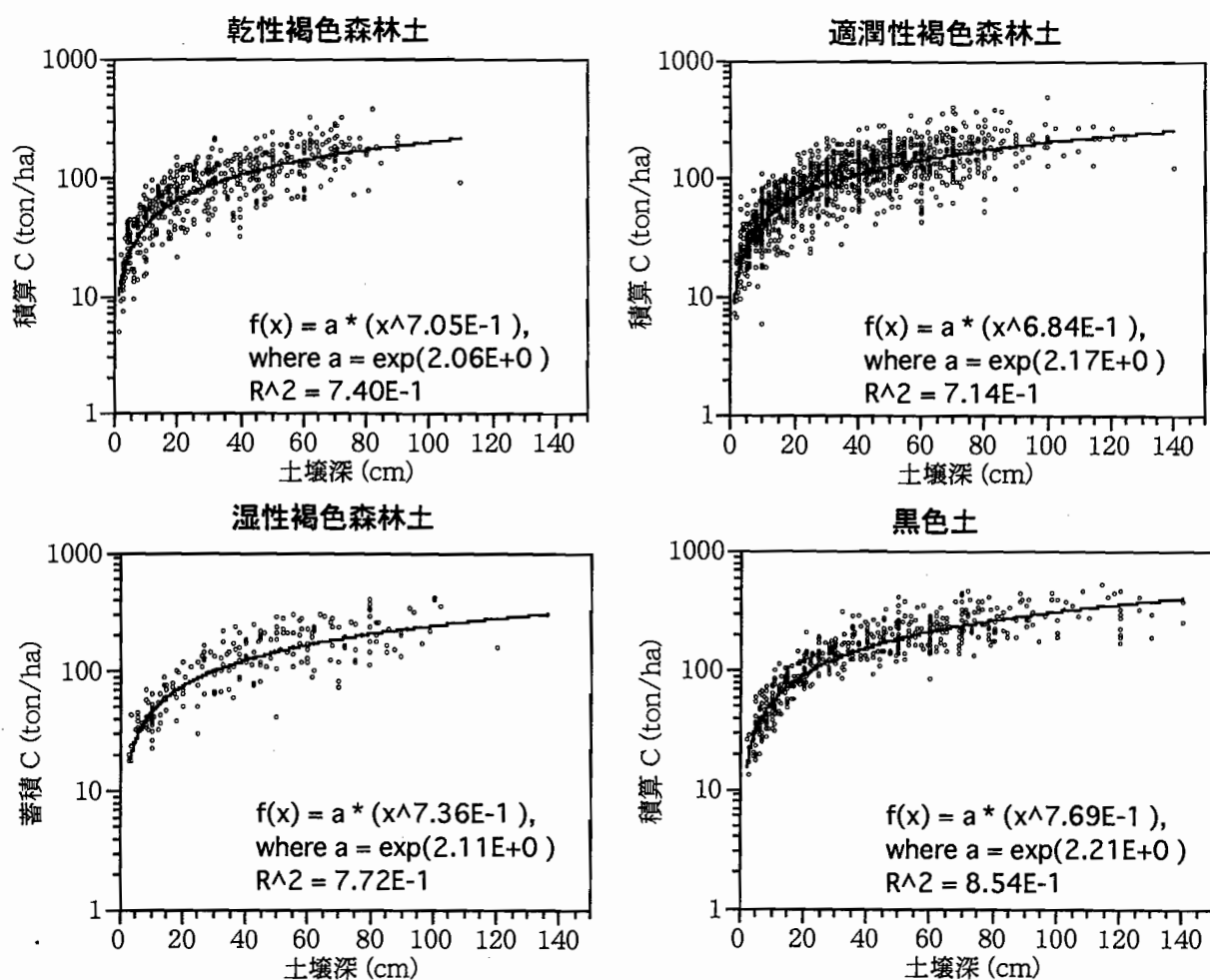


図4. 深さ方向の積算炭素量と土壌深の関係

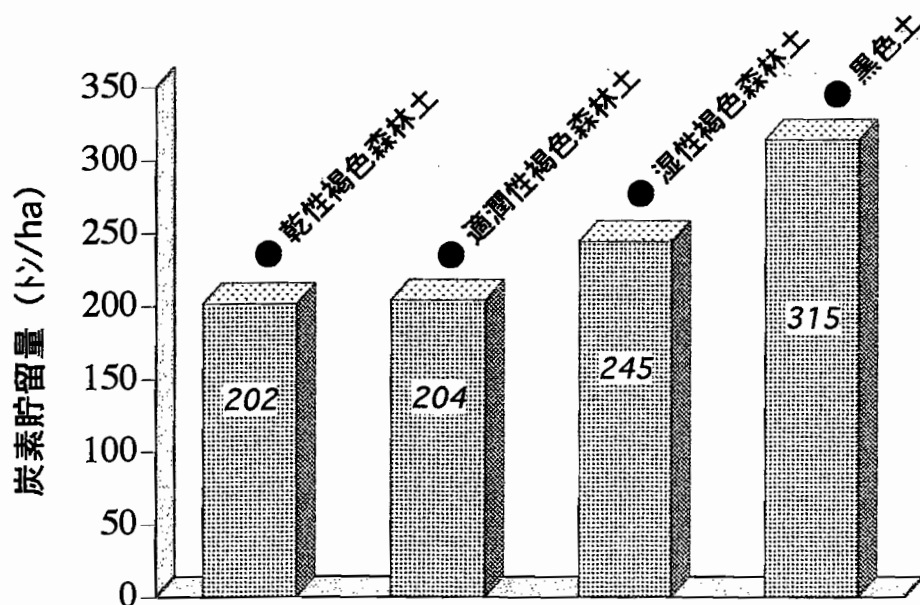


図5. 土壌型毎の単位面積当たり炭素貯留量

4. わが国の森林土壌中に貯留される炭素の試算値

これら土壌型毎の単位面積当炭素貯留量に各土壌型の面積を乗じ、これを合計して全国森林土壌中の炭素貯留量を試算した。ただし上記以外の分布面積の小さいポドソル、赤黄色土などの炭素貯留量については、ここでは仮に乾性褐色森林土の単位面積当蓄積量の数値を用いて試算した。また、各土壌型の分布割合は官・民有林で同じと仮定し、全国森林面積に国有林での土壌型面積比率を乗じて算出した。

試算の結果、わが国の森林土壌に貯留される炭素量は全体でおよそ54億tであり、そのうち70%が褐色森林土、10%強が黒色土で占められていることが明らかになった（図6）。この54億tという数値はわが国の森林樹木中に蓄えられる炭素11億tの5倍弱に当たり、またわが国で1年間に消費される化石燃料（炭素として2億9千万t）の約18年分に相当する（図7）。このように、森林土壌は驚くほど多くの炭素を封じ込めることで、よりよい環境を形作ることにも貢献しており、一方でまた土壌中に蓄えられた炭素は土壌を豊かにし、森林とそこに暮らす様々な生物の生存を支える最も基本的な役割をも果たしているといえる。

ただし、本研究で得られた試算は、限られた地域・点数の情報に基づいており、また土壌型毎の面積や炭素貯留量などについて多くの仮定を含んでいるため、今後、精度の向上を図るとともに、地域や土壌母材、植生などの要因と土壌炭素の貯留量や分解性などとの関係を解析することにより、炭素貯留様式に基づいた立地区分を行う予定である。また、土壌中の炭素プールはこれほど巨大であるため、その変化割合はわずかでも蓄積・放出の絶対量は膨大なものとなる。森林総合研究所では、この巨大な炭素プールが森林施業などのインパクトや温暖化など環境変化に対してどのように応答するかを解明・予測するための研究をさらに進めている。

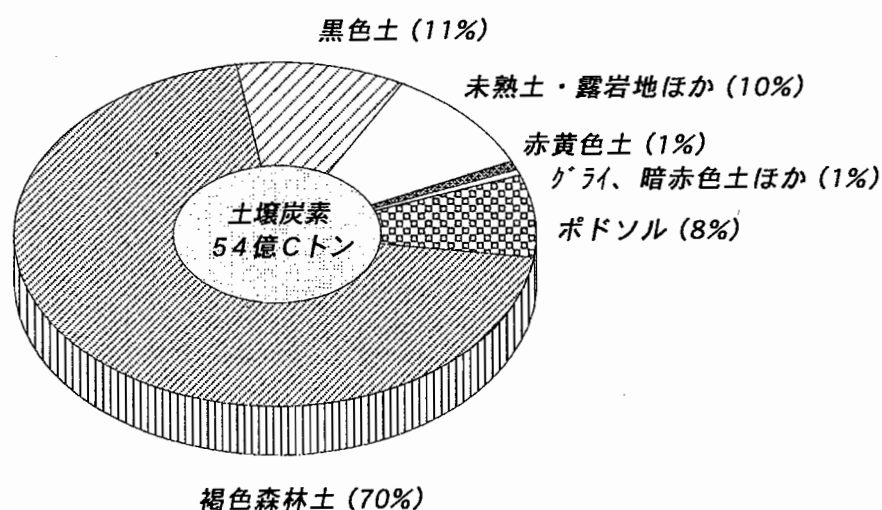


図6. わが国の森林土壌における炭素分布

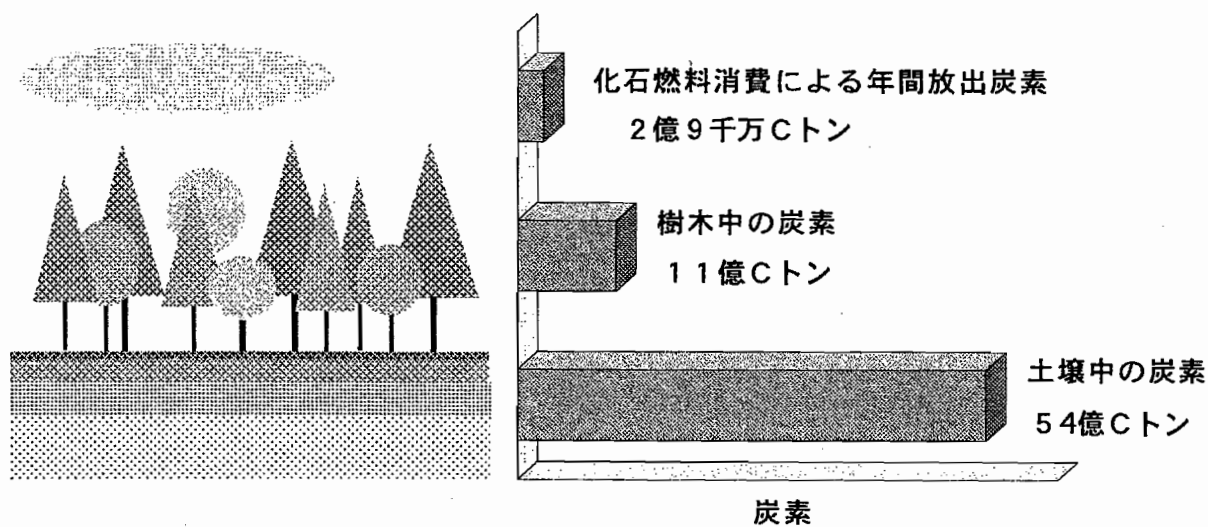


図7. わが国の森林土壌中に貯留される炭素の試算値

熱帯林における炭素の蓄積と二酸化炭素の出入り

—推定法の現状と課題—

生産技術部 物質生産研究室長 石塚 森吉

1. はじめに

熱帯地域における森林の破壊（焼き畑、農地などへの転換）と劣化（商業伐採による蓄積の減少）は、化石燃料の消費に次ぐ大気中への二酸化炭素の放出源であるとみなされている。伐採された膨大な森林バイオマスは、木材製品としてある期間残るものもあるが、かなりの部分が燃やされたり林地で腐朽し、短期間のうちに大気中の二酸化炭素となるからである。1990年時における見積もり（Dixonら1994）では、高緯度や中緯度の森林が炭素の吸収源（それぞれ 0.26 , $0.48 \times 10^9 \text{t/年}$ ）となっているのに対し、熱帯地域では $1.65 \times 10^9 \text{t/年}$ の炭素を放出していることになっている。しかし、熱帯林からの炭素放出量の見積もりに関しては、同年代のものでもさまざまな推定値が存在し、常にその不確かさが論議され続けてきた（Brown et al. 1994, Houghton, 1996）。

ここでは、熱帯林の破壊に伴う炭素収支推定の現状と問題点を整理し、不確かさの主な要因となっている森林のバイオマス量（炭素量はバイオマス量の約 $1/2$ ）の地域的な分布とその増加速度の把握について、タイの森林を例に簡便な方法を試みた結果を報告する。

2. 熱帯林の破壊・劣化に伴う炭素の流れ（フロー）

熱帯林の炭素収支の計算に用いられるデータは極めて限られているために、用いられるモデルの構造やパラメータは非常に単純である。図1（上）は、熱帯林生態系における主要な炭素の貯留場所と流れを示したものであるが、通常の収支モデルでは、伐採前の森林は光合成による炭素固定量とリターの分解や土壌呼吸による炭素放出量は等しい（生態系としての収支は0）とみなされ計算の対象には入っていない。この定常状態の森林に、図1（下）のような森林破壊と利用の転換がなされ、蓄積されていた炭素（バイオマスのほぼ半分）が大気に放出されることにな

る。さらに、裸地化によるリターや表層土壌からの炭素放出の増加、伐採された木材の用途別炭素の貯留年数、土地の利用形態に応じた炭素固定（放出）率が、非常に単純化された形であるが収支の計算に考慮されている（Houghton, 1983; Detwiler and Hall, 1988）。

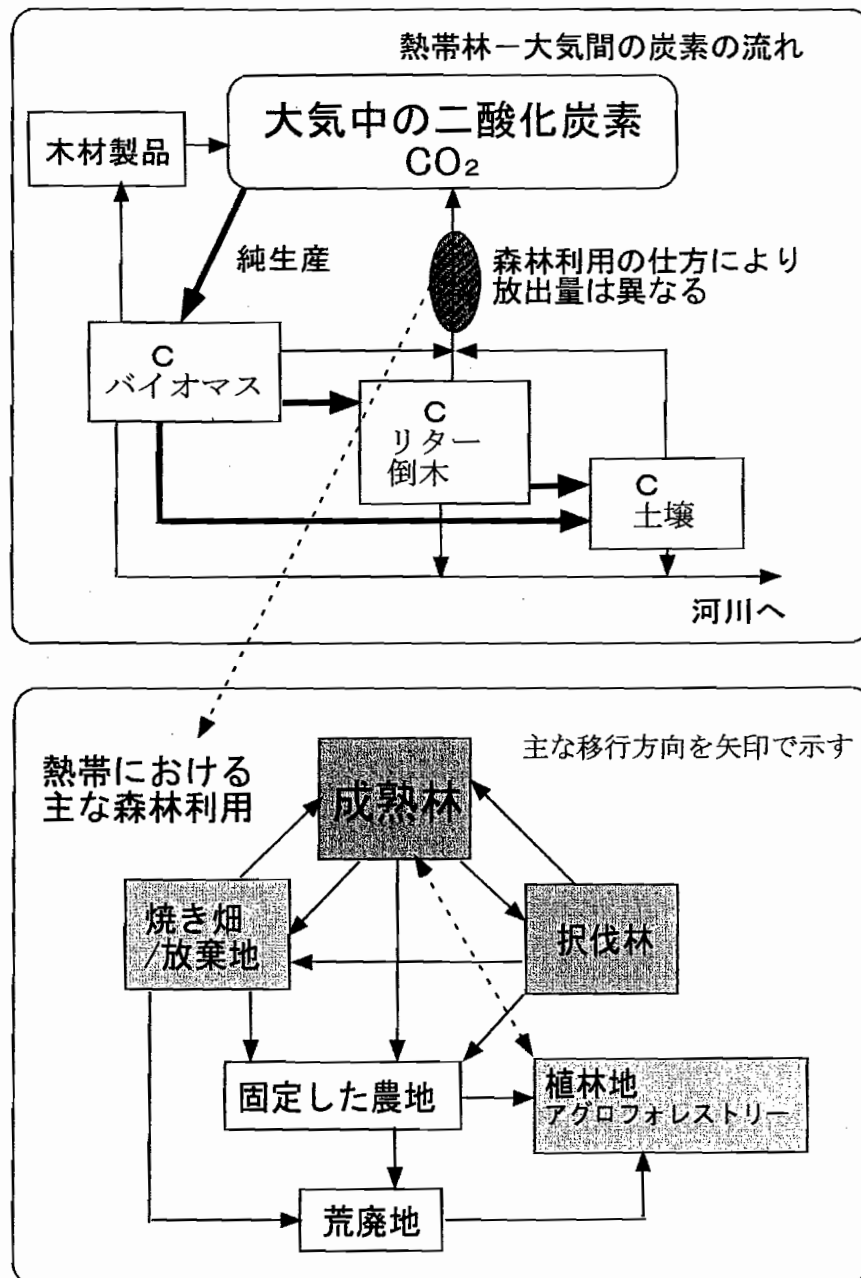


図1. 熱帯林生態系における主な森林利用（下）と
大気の中の炭素のフローとプールの基本モデル（上）

フローとプールの相対的な重要度は時間とともに変化する。
太線の矢印は、成長や再生産に伴う大気からの流れを示す。

3. 不確かさの要因

上記のような計算方法で、今までに多くの研究者が熱帯林破壊に伴う炭素放出量の推定を行ってきたが、その見積もりには大きな幅があり、不確かさが常につきまってきた。不確かさの主な要因は、主として①森林面積の減少速度、②個々の森林の変化（原生林から焼き畑、二次林から焼き畑など）、③実際の森林のバイオマス量の把握（BrownとLugo, 1984; Brownら1994）、さらに④焼き畑跡地や二次林の回復速度（Houghton, 1991）の把握の困難さにある。①と②については、近年、衛星データを駆使することによって、かなりの部分が正確に見積もられてきている

（FAO, 1993）。しかし、森林の破壊・劣化に伴い減少した個々の森林のバイオマスとその回復速度については、現在でも最大の不確かさの要因であることには変わりがない（Houghton, 1996）。特にバイオマス（炭素）密度の把握は重要で、例えば 50t C/haと200t C/haの森林を完全に破壊した場合では、炭素放出量は計算上4倍の違いになって表れるのである。

実際、アジア地域の全体をプールしたバイオマス量の平均の見積もりにも1.5～2倍の範囲があるが（表1）、HoughtonとHackler（1994）はこれらの推定値を組み合わせた場合の炭素放出量の違いの試算を行っている。

表1. 熱帯アジアの森林生態系における炭素蓄積量の見積もりの違い

（HoughtonとHackler, 1994より）

	熱帯湿潤林	熱帯季節林	熱帯乾燥林
植生における炭素量 (Mg C/ha)			
バイオマスの高推定値	250	150	60
バイオマスの低推定値	135	90	40
土壌中の炭素量			
	120	80	50
面積 (10 ⁶ ha)			
	167	122	31

4. 簡便な方法によるバイオマス密度分布と再生産速度（炭素固定量）推定の試み ータイの森林をケーススタディとしてー

以上のように、熱帯林のより正確な炭素収支の推定には、今後それぞれの地域あるいは森林タイプごとに、バイオマス密度の推定精度を向上させる必要がある。現

状では限られた調査データや文献に依存しているが、今後は林分調査とリモートセンシングを機能的、効率的に結びつけた推定法の開発が必要であろう。

そのため、比較的森林破壊の進んだタイに調査地域を設定し、バイオマス密度の簡便な推定法の検討とその分布図の作成を試みた。調査地域は、カンチャナブリ（混交落葉林と乾性フタバガキ林を主とする地域）とチェンマイ（山地性常緑樹林と乾性フタバガキ林を主とする地域）に設定し、それぞれの森林タイプの成熟林、二次林、伐採跡地など13～15か所のプロットを設け、毎木調査によるバイオマスの推定を行った。

これらの調査と文献のデータの解析から、林分の最大樹高（以下林冠高とする）と地上部バイオマスとの間に、落葉樹林（混交落葉林と乾性フタバガキ林）と常緑樹林（山地性常緑樹林と乾性常緑樹林）でそれぞれ異なる式で表せる関係があることが分かった（図2）。これは、調査プロット程度の面積（1600m²前後）を単位にすれば、林冠高を測定することで地上部バイオマスを推定できることを示している。これをもとに、空中写真による林冠区分（個々の樹冠の形状や大きさ、画像のきめなどから区分）とサンプリングによる林冠高の実測値を対比させて調査地域を林相区分し、地上部バイオマス分布図を作成した（図3）。このバイオマス密度分布図は、衛星データを用いたバイオマス推定の基礎データにされるもので、チェンマイのテイストサイトにおける分析では、乾季の始まりにおけるNDVI（規準化植生指数）がバイオマスの分布に比較的よく対応していた。また、林分の回復速度（バイオマス増加速度）をバイオマスの関数として表すことにより、このバイオマス密度分布図から地域全体の森林の炭素蓄積速度の算出を試みた。その結果、地域の森林の平均バイオマスが等しくても、バイオマスの分布の違いが地域全体の炭素蓄積速度の推定に大きく影響を与えることが明らかとなった。

5. おわりに

ここでは、熱帯林の林木の炭素蓄積にのみ焦点を当てて述べたが、林木と比較しうる炭素が土壌中に存在する。しかし、熱帯土壌の炭素蓄積量をはじめ、土壌と森林、大気間の炭素の流れに関する研究は非常に限られている。つまり、熱帯林の炭素収支は極めて限られたデータのもとに見積もられているのが現状で、今後これらのプロセスを各地の森林で明らかにしていく必要がある。また、最近、熱帯林でもタワーを用いた森林と大気の大気炭素のフラックス測定が行われるようになったことを付け加えておきたい。熱帯林破壊による炭素放出量の見積もりは社会の関心を大きく惹きつけたものの、研究はまだ始まったばかりだといえるだろう。

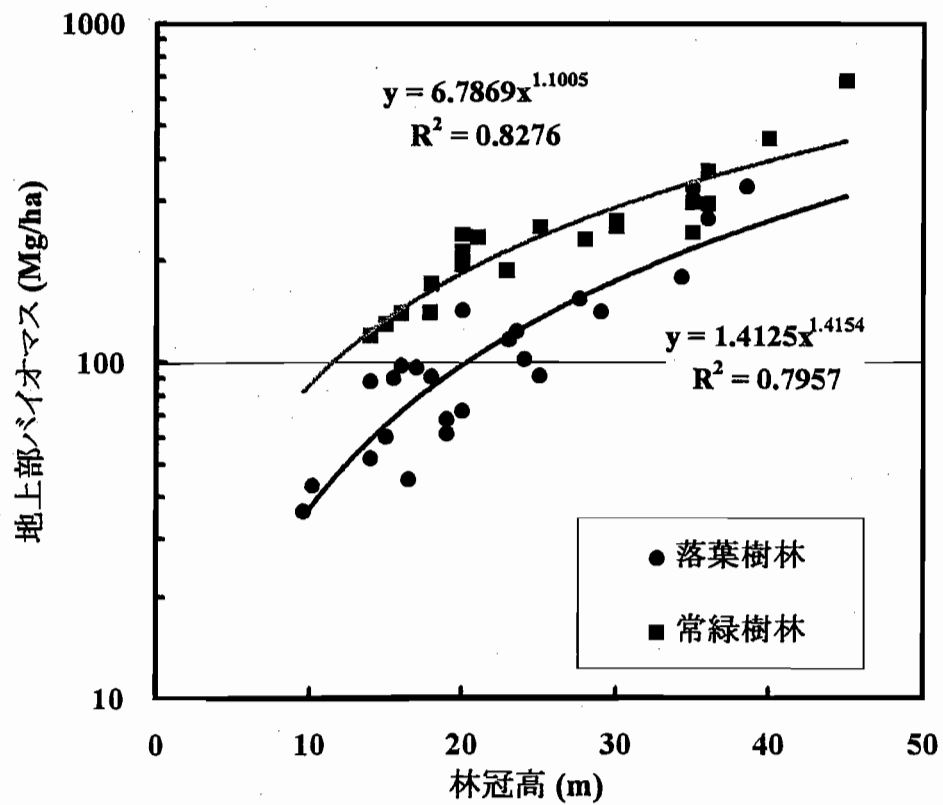


図2. タイの落葉樹林と常緑樹林における林冠高と地上部バイオマスの関係

(測定したプロットの大きさは、約400～1600m²)

林冠高が35m以上の林分では、プロットサイズが小さいために、測定した林分のバイオマスが過大評価になっていると考えられる。(落葉広葉樹林には落葉混交林、乾性フタバガキ林、常緑広葉樹林には乾性常緑林、山地性常緑樹林を含む)

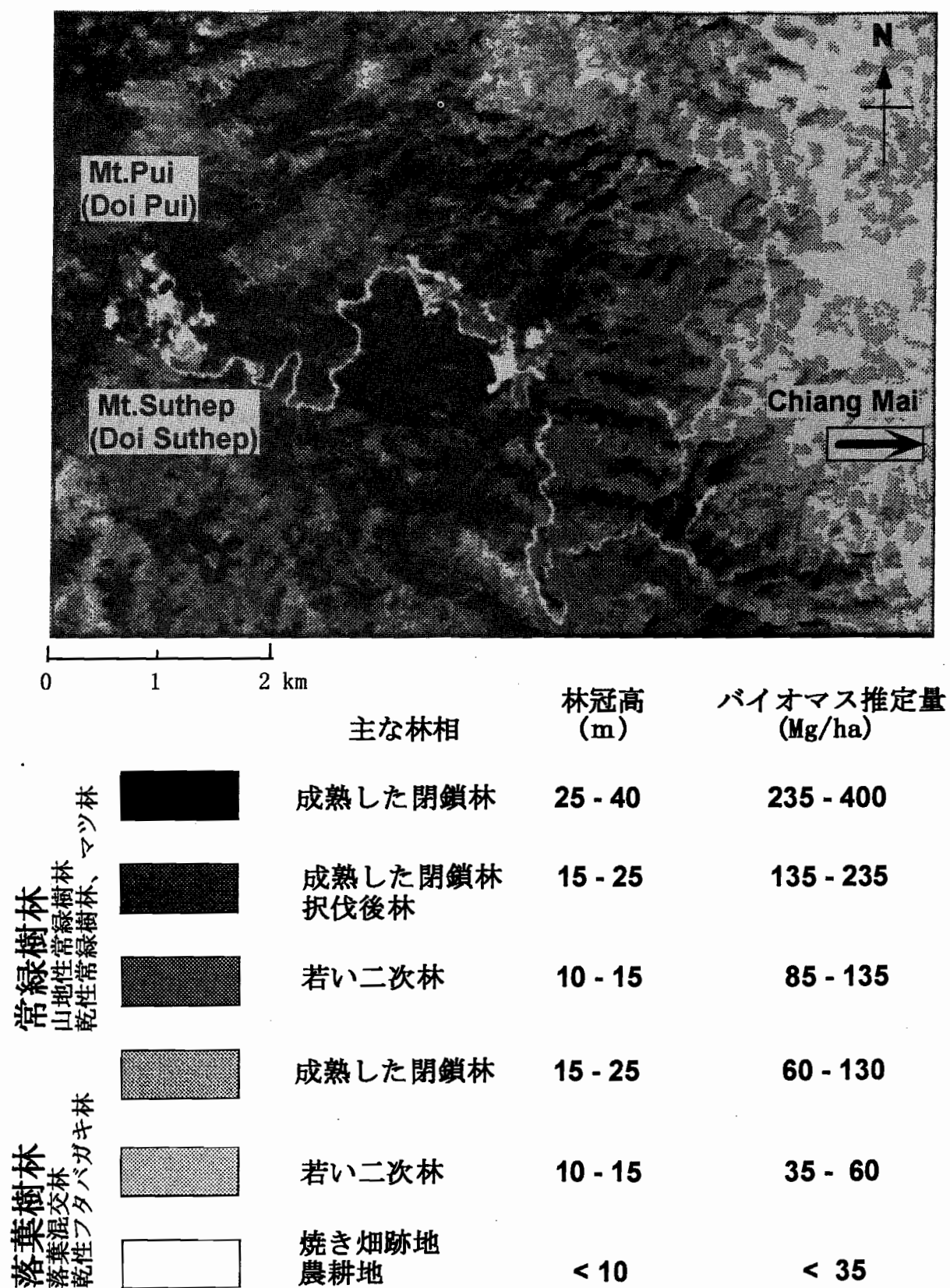


図3. タイ国チェンマイのドイ・プイ-ステープ国立公園周辺における
地上部バイオマス分布図

地球温暖化から見た木材利用

木材利用部 物性研究室長 外崎真理雄

1. はじめに

地球温暖化に対し樹木の持つ二酸化炭素吸収固定機能の活用が、人類のなしえる最も有効な対抗手段であることは広く知られつつある。同時に、現在も続いている森林破壊が化石燃料の利用に加算される形で二酸化炭素濃度の上昇をもたらしていることから、その対策が緊急の課題であるのも周知のことである。

しかしながら成熟・老齢期に入った森林が、その面積に樹体・土壌中などで多量の炭素を固定し続けてはいるものの、見かけ上二酸化炭素を放出も吸収もしない状態になっていることはあまり知られていない。

二酸化炭素濃度の増加速度を遅らせるだけの省エネなどではなく、真の意味で大気中の二酸化炭素を削減するためには、老齢化した森林の二酸化炭素吸収を活性化させ、新規造林による森林面積の拡大を後押しし、吸収した炭素を固定し続ける木材の耐久的利用の拡大が必要であるとのコンセンサスが今こそ求められている。

2. 持続的林業と木材利用

ある面積の森林において、毎年の伐採量が常に森林全体の成長量に等しいかあるいは下回る林業が行われ、適切な再植林等が行われていれば、森林は存在し続ける。このような持続的林業が行われている森林は、毎年成長量分の二酸化炭素を吸収し続け、伐出量分の炭素を木材の形で森林系外に持続的に供給し続ける。

老齢化した森林と化石燃料を用いる火力発電所の系を考えると、老齢化した森林は二酸化炭素を見かけ上吸収も放出もせず、発電所は毎年化石燃料分の二酸化炭素を排出しそれが大気中に蓄積されていく。一方、持続的林業が行われている森林とそれからの木材を燃料とするバイオマス発電所の系では、木材燃焼により二酸化炭素が排出されるが、その分は森林により吸収され、大気中の二酸化炭素を増加させずにエネルギーが持続的に供給されることになる。この場合、持続的林業が行われている森林では若齢木が多く含まれているため、面積あたりの炭素固定量は老齢化

した森林に比較して小さくなるが、その分を放出と見なしたとしても一定期間が過ぎれば化石燃料使用の方が大気中により多くの二酸化炭素を放出し続けることになる。

持続的林業は、森林を単に放置する、あるいは破壊をもたらすような木材伐採と比較して、再植林・間伐等様々なコストの投入を要する。当然のことながらそこから生産される木材を利用することにより経済的モチベーションが与えられなければ、持続的林業は成立し得ないことになる。

生物多様性の保全などのために気候・土壌条件などに対応した極相生態系のままに維持すべき森林も存在する。しかし人類がその生存のために資源を必要とする以上、循環生産可能な森林とはっきりと分けて考え、その活用を図ることが重要である。

3. 建築における木材利用

木材の材料としての特長は重量当たり約半分の炭素を、焼却あるいは腐朽などにより放出されるまで固定していることである。これは樹木が炭素を固定していることと意味的には同じである。例えば1 haの土地に建坪100m²の木造住宅が60軒建っているとすると式1に示すようにその炭素固定量は300t-Cとなり、日本の森林バイオマスと森林土壌のha当たりの炭素固定量を大きく上回る。すなわち炭素をほとんど固定していない他材料で造られた住宅を木造住宅に転換していくことは、新規造林の余地がない日本にとって、都市に新たな林を作っていくことと同じ意味を持つ。

式1. 木造住宅地の炭素固定量

$$\begin{array}{ccccccccc} \text{木材使用量} & & \text{床面積} & & \text{住宅数} & & \text{炭素量} & & \text{炭素固定量} \\ 0.2\text{m}^3/\text{m}^2 & \times & 100\text{m}^2/\text{軒} & \times & 60\text{軒}/\text{ha} & \times & 0.25\text{t-C}/\text{m}^3 & = & 300\text{t-C}/\text{ha} \end{array}$$

一つの試算として平成8年のデータから新設着工建築物の床面積を2億6千万m²とし、構造別の比率を鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造8%，鉄筋コンクリート（RC）造18%，鉄骨（S）造36%とした。この中で建築法規上木造代替可能なものとしてとりあえず3階建て以下の建築物と仮定し、各工法毎のその面積比率をそれぞれ7%，36%，85%とすると、毎年の炭素固定量は式2に示すように489万t増加することになる。

式2. 他工法建築物の木造代替による炭素固定量の変化

$$\begin{array}{lcl} \text{着工床面積} & \text{SRC・RC・S造比率} \times 3 \text{階以下比率} & \text{木造炭素固定量} \\ 26000 \text{万m}^2 & \times (0.08 \times 0.07 + 0.18 \times 0.36 + 0.36 \times 0.85) & \times 0.05 \text{t-C/m}^2 = 489 \text{万t-C} \end{array}$$

木質建材は他材料と比較して製造時の消費エネルギーすなわち炭素排出が小さいことが知られている（表1）。その結果として全建築物について構造別の建築時の炭素排出量の試算ではm²当たり、木造59kg-C、SRC造156kg-C、RC造133kg-C、S造85kg-Cと木造が最も小さくなっている（表2）。この木造との炭素排出量の差を先の試算にそれぞれ当てはめると式3に示すように毎年346万tの炭素排出を削減できることになる。

表1. 主要建設資材の炭素排出量原単位

建設資材	炭素排出量 (kg-C/kg)
砂利・石材	0.0003
製材	0.0078
合板	0.0487
合成樹脂製品	0.176
板ガラス	0.414
ガラス繊維	0.579
セメント	0.235
建設用陶磁器	0.114
鉄鋼（棒鋼）	0.173
鉄鋼（鋼板）	0.436
銅	0.280
アルミニウム	1.765

表2. 各種建築工法の炭素排出量原単位

（酒井寛二，漆崎昇，中原智哉：環境システム研究，p525-532，vol.25，(10)1997）

建築工法	炭素排出量 (kg-C/m ²)	木造との差
木造	59	--
SRC造	156	97
RC造	133	74
S造	85	26

式3. 他工法建築物の木造代替による炭素排出量の変化

$$\text{着工床面積} \quad \text{SRC} \cdot \text{RC} \cdot \text{S造比率} \times 3 \text{ 階以下比率} \times \text{木造との炭素排出量差} \quad \text{単位換算}$$

$$26000 \text{ 万 m}^2 \times (0.08 \times 0.07 \times 97 \text{ kg-C/m}^2 + 0.18 \times 0.36 \times 74 \text{ kg-C/m}^2 + 0.36 \times 0.85 \times 26 \text{ kg-C/m}^2) / 1000 \text{ kg/t}$$

$$\text{炭素排出量差}$$

$$= \overset{346}{\cancel{489}} \text{ 万 t-C}$$

このように建築において木造代替を進めることは炭素固定のみならず排出削減の点でも大きな意味を持つ。木造でも大断面の柱・梁を用いたり、間伐材等からの角材で厚い壁を構成するなど面積当たりの木材使用量を増やした構法も普及し始めている。床壁材のような内装材料における木材代替も構造的利用と比較すれば量的には小さいが重要である。また、木造では建設できない高層ビルなどで、構造躯体を他工法としても間仕切り壁などの非耐力壁部分に木材を積極的に利用していくことは、木材利用拡大の点で大きな可能性を持つ。

4. 木材の耐久的利用

現時点の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の森林の二酸化炭素吸収などに関するガイドラインでは、森林系外に持ち出された木材は短期的なストック量の変化は無視できるとして、伐採時において炭素排出が行われたものと見なしている（もちろん持続的林業ではその排出量は同時に吸収されると見なされる）。しかし現実には木材の形で固定されている炭素ストック量は増加している可能性があり、グローバルな炭素循環を正確に反映していないという問題点が指摘されている。

例えばわが国における試算では、住宅のみについてであるが、1963年から1993年の間に6千万tから1.35億tと毎年約250万t炭素固定量が増加しており、これは大気中から積極的に二酸化炭素を取り除いてきたことになる。

そこで次回の第4回締約国会議（COP4）に向けて科学技術補助機関（SBSTA）において評価のための議論が進められている。その中のストックチェンジアプローチでは木材利用国が木材の耐久的利用を行っている間はその分の炭素をその国が吸収したものと見なすというものである。私見では森林・木材利用による二酸化炭素吸収を化石燃料削減量にリンクすべきではないと考えているが、建築などにおける木材の耐久的利用を拡大するための誘因になりうることから意味は大きい。持続的林

業からの木材は、廃棄された時点で排出にはならないが吸収とは見なされなくなる。従って除却された建物からの木質系廃材のリサイクルは重要であり、そのためのシステムの充実が求められる。

また木材の他材料にはない特長として燃焼等によるエネルギーリサイクルが可能ながあげられる。建築物中の木材による炭素固定量はある時点で飽和状態になることが考えられるが、木材のエネルギーリサイクルによる化石燃料削減は二酸化炭素問題が存在する限り永続的に意味を持つ。例えばわが国の年間丸太換算木材需要量を1億m³で製品歩留まりを70%、木材の燃焼エネルギーを排出炭素あたり化石燃料の1/2とし、この全量がエネルギーリサイクルされたと仮定すると、式4に示すように875万tの化石燃料からの炭素排出を削減できることになる。

式4. 木材のエネルギーリサイクルによる化石燃料削減効果

$$\begin{array}{ccccccc} \text{丸太換算木材需要量} & \text{製品歩留まり} & \text{炭素量} & \text{エネルギー効率} & \text{炭素排出削減量} \\ 10000\text{万m}^3 & \times & 0.7 & \times & 0.25\text{t-C/m}^3 & \times & 1/2 = 875\text{万t-C} \end{array}$$

木造建築物の長寿命化は年間着工数の減少による省エネルギー効果と必要量の減少による資源節約の意味を持つ。木造建築物の年間着工床面積を9700万m²とし、寿命が3倍となって着工量が1/3となったとすると、式5に示すように382万tの炭素放出が削減できる。また製材用木材需要のうち建築用は約4000万m³であるがこれが1/3となれば現在の製材用国産材の供給量でも充分となる。

式5. 木造建築物の長寿命化（3倍）による炭素排出量の変化

$$\begin{array}{ccccccc} \text{木造着工床面積} & \text{減少割合} & \text{木造炭素排出量} & \text{単位換算} & \text{炭素排出量差} \\ 9700\text{万m}^2 & \times & 2/3 & \times & 59\text{kg-C/m}^2 & / & 1000\text{kg/t} = 382\text{万t-C} \end{array}$$

平成10年10月9日発行

平成10年度 研究発表会要旨集

編集・発行 農林水産省林野庁 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県稲敷郡茎崎町松の里1

Tel. 0298-73-3211 Fax. 0298-74-8507