

磯焼けの話⑩⑥ 二酸化炭素の排出と吸収について（Ⅱ）

～森林のCO₂吸収量とその計算方法～

技術士（衛生工学・建設・環境） 鍵谷 司

はじめに

『環境施設』前号（第162号；2020.12）では、海のCO₂吸収量を取り上げるにあたり、排出量の実態と我が国の排出量と削減目標を簡略に整理した。とくに、温室効果ガスとその種類・効果、炭素と二酸化炭素、カーボンニュートラルやカーボンオフセット、低炭素社会や脱炭素社会など用語が乱立し、理解を複雑にしているのが、簡単に解説した。また、世界各国がCO₂削減に取り組む中、我が国が国連に報告した削減目標は2030年度にマイナス26%（1990年度比）と低いが、しかし、2050年に実質排出量ゼロなど積極的な取り組みが宣言されていることなどを紹介した。

一方、CO₂の実質排出量を削減するためには、その吸収量を増やすことも大きな手段である。森林や海も大きな吸収源であるが、「排出量」のみが大きく取り上げられ、吸収量に関する議論は少ない。排出量が増えても吸収量を増えれば、実質排出量は増加しないことになるが？ 京都議定書でカウントできる吸収量とは、整備された人工林の光合成によるCO₂吸収量であるが、その計算方法等について調べてみた。

CO₂の排出と吸収について連載になるので、以下に『環境施設』前号（第162号；2020.12）の連載（Ⅰ）で取り上げた目次を記載する。

1. 温室効果ガスとその排出量について

1. 1 温室効果ガスについて

- （1）地球温暖化のメカニズム；図1
- （2）温室効果ガスの種類について；図2
- （3）人為起源の温室効果ガス；図3

1. 2 温室効果ガスの種類と温室効果

（1）地球温暖化係数とは；表1

（2）二酸化炭素（CO₂）と炭素（C）の換算方法

（3）カーボンニュートラル、カーボンオフセットとは；図3

（4）低炭素社会&脱炭素社会とは！

1. 3 二酸化炭素排出量について

（1）国連気候変動枠組条約締結国会議

（2）日本の温室効果ガス削減目標と排出の推移

①日本の温室効果ガス削減目標；図4

②日本の温室効果ガス排出量；図5

2. 温室効果ガスの吸収量について

素朴な疑問がある。温室効果ガスの実質排出量ゼロとは、排出量から吸収量を差し引いて増加がゼロであることを表す。逆にいえば、いくら排出してもそのぶん吸収量を増やせば増加しないはずである。意外にも吸収に関する議論は少ないように思えるので整理した。また、海や海藻類等も膨大にCO₂を吸収あるいは固定化しているはずである。その取り扱いについても関心があるので紹介する。

2. 1 二酸化炭素の吸収量について

（1）CO₂吸収量の推移

2018年度のCO₂吸収源である森林整備、農地管理・牧草地管理・都市緑化活動による吸収量の内訳を表2に示す。森林経営活動に係る森林整備による吸収量は約4,720万トンであり、総吸収量の約84%を占めており、農地管理活動等による吸収量

表2 京都議定書に基づく吸収源活動からの排出・吸収量（2018年度）⁴⁾

吸収源活動 (定義については参考のとおり)	2018年度 [百万トンCO ₂ 換算]
森林吸収源対策①	-47.0
新規植林・再植林活動	-1.4
森林減少活動	+1.6
森林経営活動	-47.2
農地管理・牧草地管理・都市緑化等の推進②	-8.8
農地管理活動	-6.5
牧草地管理活動	-1.0
植生回復活動	-1.2
合計（①+②）	-55.9

はわずか16%程度である。なお、京都議定書では、森林経営活動によるCO₂吸収量の算入可能な上限値を基準年（1990年）の3.5%程度と規定しており、吸収量を限りなく増やすことはできない。

京都議定書に基づく吸収源活動による2013～2018年度の温室効果ガス吸収量（CO₂換算）の推移は、図6に示したように年間5,540～6,100万トンでおおよそ1割程度より変動しないが、やや吸収量の減少傾向が認められる。吸収源活動には、森林吸収源対策と農地管理・牧草地管理・都市緑化活動があり、図7に示したように吸収量のおおよそ85%程度が森林による吸収量であるが、森林の吸収量は減少傾向にあり、林業の不振などから森林整備が進まないことを示唆する。結果的に森林荒廃が進み、土石流等の災害の引き金になっているのではと心配である。

また、前号（第162号）の図5に示したCO₂排出量は、この吸収量を差し引いた量であるので、実際はこの吸収分が多く排出されている。排出総量に占める吸収量の割合は、4.1～4.3%程度であり、大きな変動はない。京都議定書で、基準年の総排出量の3.5%相当と規定されているためである。

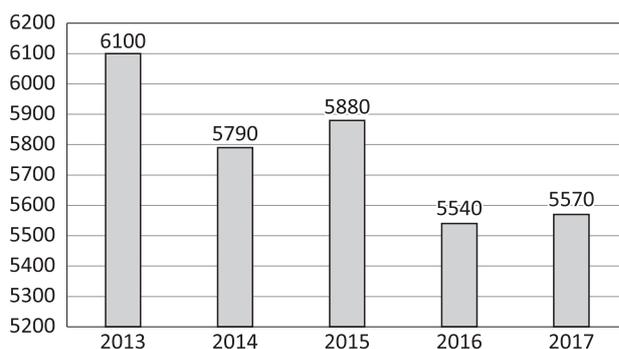


図6 CO₂総吸収量（万トン）の推移

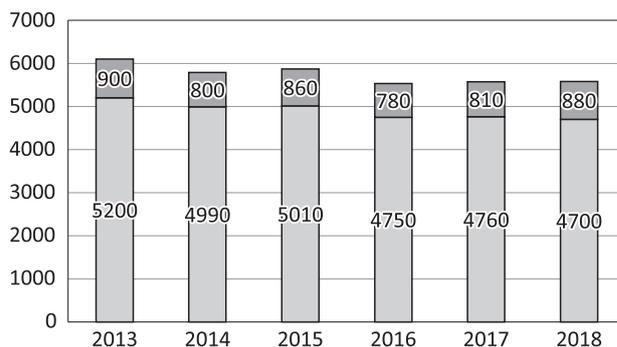


図7 吸収源別のCO₂吸収量（万トン）の推移
(上段：農地管理等、下段：森林対策)

(2) 吸収源活動の定義について

CO₂の吸収源の種類には、海洋、森林、土壌があるが、京都議定書で吸収源活動について詳細な定めがある。基本的には、図8に示したようにCO₂の吸収源活動は、単に植物を増やすとカウントされるのではなく、植林や植生の回復が中心となり、次の7項目の分野が定められている。なお、森林の定義は、その場での成熟時に最低2.5mの樹高に達する可能性のある樹木種で10～30%以上の樹冠率（または同等の群体レベル）を有する最低面積が0.05～1.0ha（500～10,000m²）の土地である。

- ①新規植林：植樹、播種、自然種子の散布を通じて、50年間以上森林でなかった土地を、直接・人為的に森林に転換する行為。事業開始時を含む過去50年間にわたって森林ではなかった土地を対象とする。
- ②再植林：森林から非森林に転換された土地に、植樹、播種、自然種子の散布を行い、非森林を直接・人為的に森林に転換する行為。この

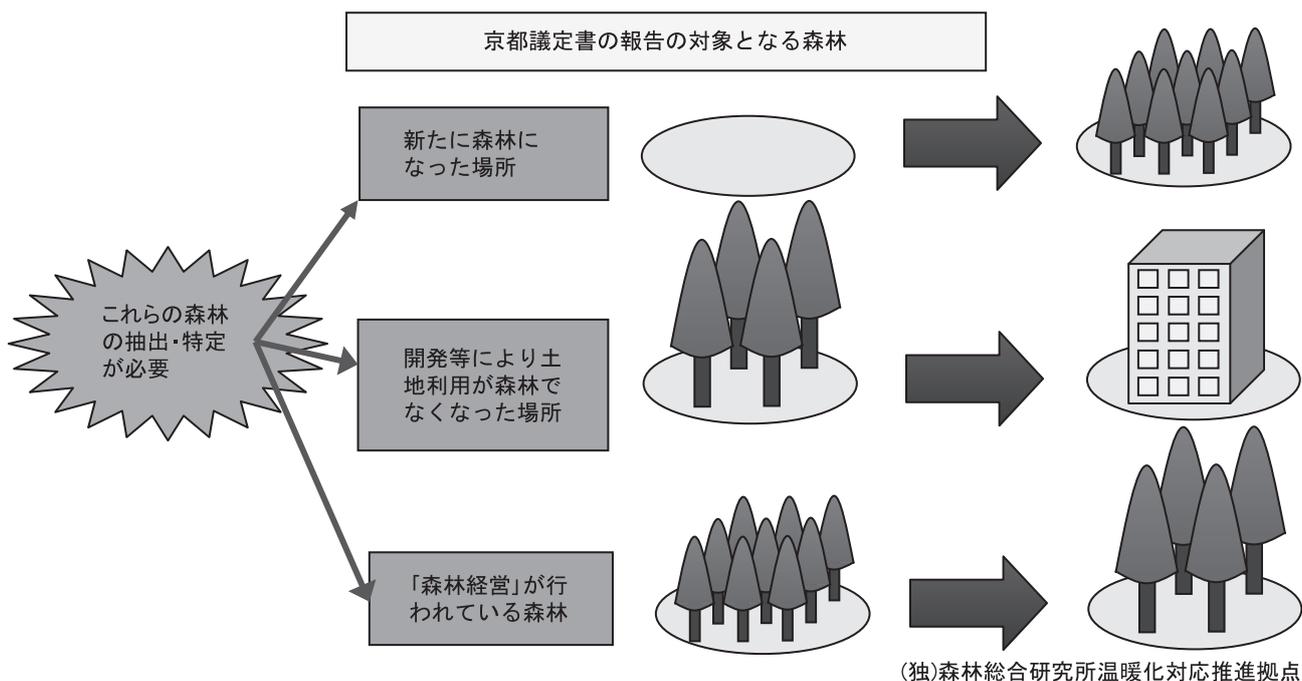


図8 CO₂吸収源として認められる森林⁸⁾

定義は揺れ動いており、現在のところ、事業開始時と1989年12月30日時点は森林ではなかった(1989年12月30日から事業開始までの期間は森林であってもよい)土地を対象としている。

- ③森林減少：森林を直接・人為的に非森林に転換すること(伐採、間伐、野焼き)。
- ④植生回復：0.05ha以上の面積がある土地で、植生の構築を通じて直接・人為的に炭素蓄積を増加させる行為。新規植林や再植林の定義に合致しない場合のみ。
- ⑤森林管理：持続可能な方法で、森林の適切な生態学的機能(生物多様性を含む)、経済的機能、社会的機能を満たすことを目的に、森林を管理・利用する行為やシステム。
- ⑥耕作地管理：農作物が生育する土地、休耕地、一時的に農作物の生産に利用されていない土地において、その管理を行う行為やシステム。
- ⑦放牧地管理：生産される植物と家畜の量および種類の管理を目的に、家畜生産に利用される土地で行う行為やシステム。

以上のように、CO₂吸収源の対象となる森林とは、1990(平成2)年時点で森林でなかった場所

にそれ以降に「新規植林」や「再植林」した森林、あるいはそれ以降に「森林経営」を施した森林である。前者は、現在、社会活動を営んでいる土地や農地など別の土地利用から森林に転換した場合のみ認められるため、森林面積が国土面積の7割を占める日本には、対象地はほとんどない。つまり、吸収源になり得る森林は「森林経営」で、間伐等の適切な整備がなされた森林である。

一方、保安林に指定されている天然林も吸収源として含まれる。つまり、保安林の指定を増やして整備すれば、天然林でも吸収源としてカウントできるので、資金を投入して保安林整備を進めるべきであり、結果的に山林の荒廃を防止し、地域の雇用を促進し、土石流等の災害防止にも寄与するのではないかと思料される。

【樹木は二酸化炭素の排出する?】

植物は、光合成によりCO₂を吸収して酸素を放出する。光合成の仕組みは図9の葉の構造に示したように、根から吸収した水は葉脈を通じて葉の表面に供給され、葉の裏側の気孔からCO₂を吸収し、これらを原料として主に葉の表面で太陽光(人工光でも可)のエネルギーで下記に示した化学反

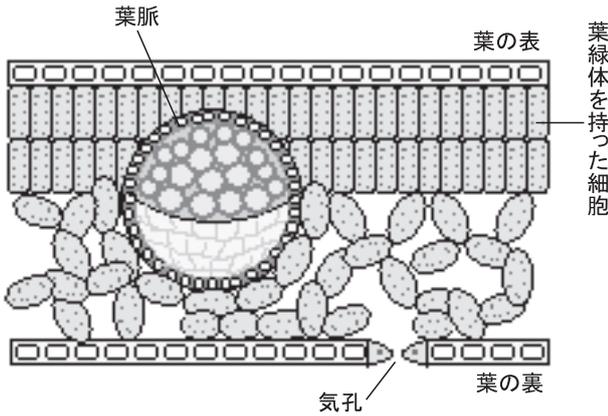
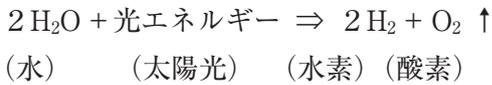


図9 植物の葉のつくりと働き

応により炭水化物（デンプン）と酸素を生成し、余分な酸素を気孔から放出する。



しかし、これだけでは植物は成長することができない。植物の成長、つまり、幹や枝葉を増やしたり、花を咲かせるには新しい組織の形成、および植物体を維持するためにはエネルギーが必要である。このため、空気中の酸素を吸収して製造した炭水化物（デンプン）を原料にしてエネルギーを作り、成長や維持に使うのである（図10）。空気中の酸素は気孔から呼吸することで取り込んでいる。つまり、植物は、基本的に昼間には光合成により酸素を放出し、夜間にはCO₂を放出するのである。なお、光合成で生成した酸素を使用することもある。

光合成が行われている昼間にあっては使用するCO₂量は呼吸により放出する量よりも多いので、差し引きすると樹木はCO₂を吸収していることになる。成長期の若い森林では、樹木はCO₂をどんどん吸収して大きくなるが、成熟した森林になると、吸収量に対する呼吸量がしだいに多くなり、差し引きの吸収能力は低下する。つまり、植物は、昼間は酸素を吐き出し、夜はCO₂を吐き出しているのである。

このように植物による炭素の固定量は、図11に示したように光合成の原料となるCO₂の吸収と植物体の成長・維持に必要なエネルギーを作る過程で生成するCO₂の排出の差として計上される。そ

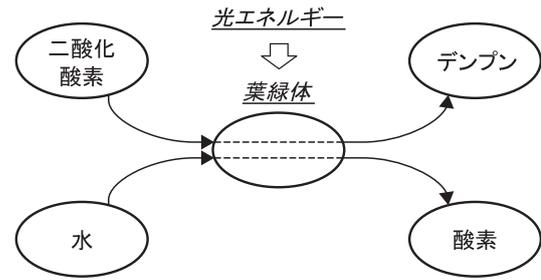


図10 光合成の仕組み

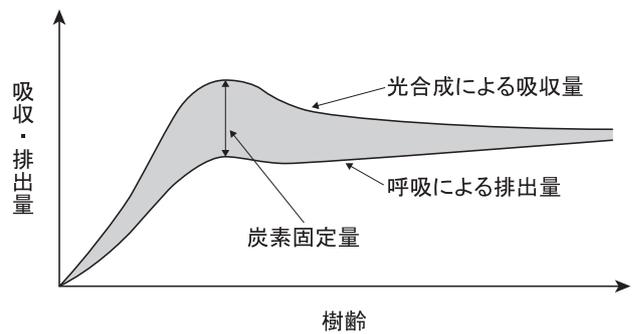


図11 植物の二酸化炭素の吸収と排出

の結果、樹齢の若い成長期の植物の光合成によるCO₂吸収量は呼吸による排出量よりも多く、樹齢が高くなるにしたがって成長速度が低下し、炭素の固定量は低下する傾向を呈することになる。

(3) 森林のCO₂吸収量は！

京都議定書で定める吸収源活動では、CO₂吸収量としてカウントできる条件は、ほぼ「森林経営」において間伐等の適切な整備された森林や伐採して材木として利用した木材に限られる。いわば人工林（育成林）が対象なのである。天然林でも光合成により空気中のCO₂を吸収するが、木々の呼吸や枯死木の分解などでCO₂を放出し、長期的にみればCO₂の増減はないとの考え方である。

【森林吸収量の算定方法は？】

○樹木の葉は、大気から吸収したCO₂と土壌から吸収した水を用い、光合成によりブドウ糖などの炭水化物を生成し、酸素を発生する。作られる炭水化物の炭素は、すべて大気中のCO₂由来する。

- 樹木は、光合成により作られた炭水化物をもとに、幹・根・枝葉を作って樹体を成長させる。
- つまり、樹体の炭素量を調べれば、樹木がそれまでに吸収（炭素固定）したCO₂量がわかる。一般に植物体の乾燥重量（バイオマス）のおよそ1/2が炭素量なので、バイオマス（材積）を調べれば推定できる。
- 葉は光合成と同時に呼吸もし、酸素を吸ってCO₂を放出する。幹・根・枝など樹体のすべてで呼吸する。光合成量が呼吸量を上回った分が成長（炭素固定）に向けられ、CO₂吸収量になる。つまり、樹体は呼吸によりCO₂を排出し、光合成によりCO₂を吸収する。その差が大きいほど吸収量は多いが、成長の過程でその差に違いがある。通常、森林吸収量は図12に示す方法で計算している⁵⁾⁶⁾。

吸収量（炭素t/年）＝

$$\text{幹の体積の増加量 (m}^3\text{/年)} \times \text{拡大係数} \times (1 + \text{地上部・地下部比}) \times \text{容積密度 (t/m}^3\text{)} \times \text{炭素含有率}$$

- 幹の体積（幹材積）；樹木の種類と林齢から平均的な幹材積を「収穫表」を利用して計算する。この収穫表をもとに1年間に増加した幹材積（表3）を把握する⁵⁾。
- 枝・葉・根の部分の炭素蓄積；幹材積の増加量に拡大係数を掛けて、枝・葉の量も加え、地上

部全体の量を把握する。さらに、地下部の根の部分も加えるため（1＋地上部・地下部比）を掛けて、枝・葉・根も含めた樹木全体の増加量（体積）を把握する。

- 炭素の量は重量で表すので、体積から重量に変換するために容積密度を掛け、さらに、樹木の重量あたりの炭素含有率（おおよそ50%）を掛けて算出する。

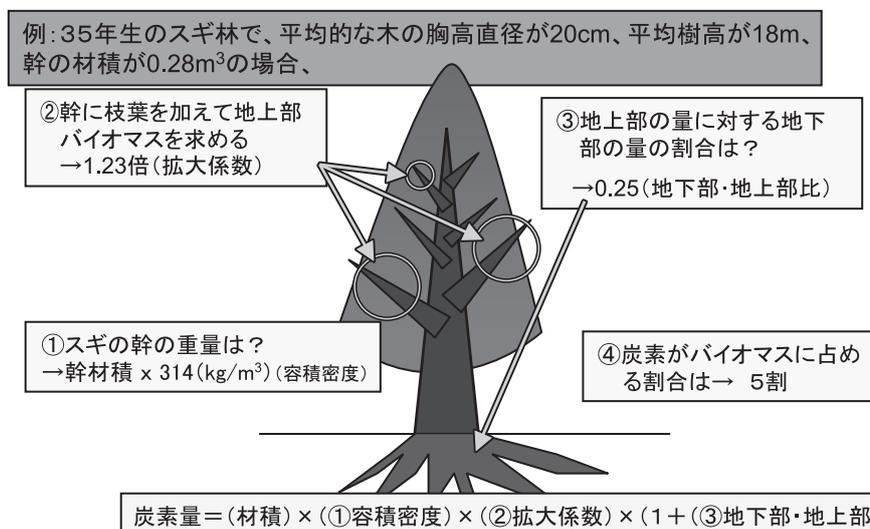
- 拡大係数や地上部・地下部の比率、容積密度は樹種によって異なるので、調査結果などを参考にする。

木1本に固定されている炭素の量の計算方法を図12に示す。

【具体的な計算事例】

針葉樹のスギ人工林、ヒノキ人工林および広葉樹天然林の炭素量およびCO₂吸収量を計算した。炭素の吸収量は、樹種や樹齢により異なるので、上記の3種類について樹齢40年前後の樹木を取り上げた。なお、木の成長速度は樹齢、種類、気候、土壌、日射量や降雨量など多くの要因に影響されるので、平均的な目安を計算したものである。計算条件は次の通りである。

- ヘクタール（ha）あたり1,000本の立木があると仮定
- 樹齢を30～35年および36～40年の5年間の



バイオマス量を算出するために必要な係数の例

		拡大係数		地下部・地上部比	容積密度 (kg/m ³)
		20年生以下	21年生以上		
針葉樹	スギ	1.57	1.23	0.25	314
	ヒノキ	1.55	1.24	0.26	407
	アカマツ	1.63	1.23	0.26	451
	カラマツ	1.50	1.15	0.29	404
	トドマツ	1.88	1.38	0.21	318
	エゾマツ	2.18	1.48	0.23	357
	その他	1.40	1.40	0.40	423
広葉樹	クヌギ	1.36	1.32	0.26	668
	ナラ	1.40	1.26	0.26	624
	その他	1.52	1.33	0.26	646

出典：日本国温室効果ガスインベントリ報告書(2008.5)
(注)針葉樹及び広葉樹の「その他」欄におけるそれぞれの値は、適用する地域により異なる。

図12 杉を事例にした炭素蓄積量の計算方法⁸⁾

炭素吸収量を計算し、1年間あたりに換算した。また、炭素量に3.67倍してCO₂量を算出した。

①スギ人工林の場合

○樹齢30～35年生のスギの炭素量およびCO₂蓄積量の算出

- 材積；279m³/haよりhaあたり1,000本として約0.28m³/本
- 5年間でこの木1本に固定されている炭素量
 $= 0.28\text{m}^3 \times 314\text{kg/m}^3 \times 1.23 \times (1 + 0.25) \times 0.5 \div 55\text{kg/本}$

○樹齢36～40年生のスギの炭素量およびCO₂蓄積量の算出

- 材積；328m³/haよりhaあたり1,000本として約0.33m³/本
- この木1本に固定されている炭素量は、
 $= 0.33\text{m}^3 \times 314\text{kg/m}^3 \times 1.23 \times (1 + 0.25) \times 0.5 \div 80\text{kg/本}$

《計算結果》スギ1本あたり5年間で約25kgの炭素を吸収したと算出されるので、年間5kgである。CO₂換算で年間約18kgに相当する。森林1haあたりでは年間CO₂換算で約18tになる。

②ヒノキ人工林の場合

○樹齢30～35年生のヒノキの炭素量およびCO₂蓄積量の算出

- 材積；208m³/haよりhaあたり1,000本として約0.21m³/本
- 5年間でこの木1本に固定されている炭素量
 $= 0.21\text{m}^3 \times 407\text{kg/m}^3 \times 1.24 \times (1 + 0.26) \times 0.5 \div 67\text{kg/本}$

○樹齢36～40年生のヒノキの炭素量およびCO₂蓄積量の算出

- 材積；240m³/haよりhaあたり1,000本として約0.24m³/本
- この木1本に固定されている炭素量は、
 $= 0.24\text{m}^3 \times 407\text{kg/m}^3 \times 1.24 \times (1 + 0.26) \times 0.5 \div 76\text{kg/本}$

《計算結果》ヒノキ1本あたり5年間で約9kgの炭素を吸収したと算出されるので、年間1.8kgである。CO₂換算で年間約6.6kgに相当する。森林1haあたりでは年間CO₂換算で約7tになる。

③広葉樹天然林の場合

○樹齢30～35年生の広葉樹の炭素量およびCO₂蓄積量の算出

- 材積；94m³/haよりhaあたり1,000本として約0.09m³/本
- 5年間でこの木1本に固定されている炭素量
 $= 0.09\text{m}^3 \times 469\text{kg/m}^3 \times 1.37 \times (1 + 0.26) \times 0.5 \div 27\text{kg/本}$

○樹齢36～40年生の広葉樹の炭素量およびCO₂蓄積量の算出

- 材積；105m³/haよりhaあたり1,000本として約0.11m³/本
- この木1本に固定されている炭素量は、
 $= 0.11\text{m}^3 \times 469\text{kg/m}^3 \times 1.24 \times (1 + 0.26) \times 0.5 \div 40\text{kg/本}$

《計算結果》広葉樹1本あたり5年間で約13kgの炭素を吸収したと算出されるので、年間2.6kgである。CO₂換算で年間約9.5kgに相当する。森林1haあたりでは年間CO₂換算で約9.5tになる。

【考察】

図13に樹種別のCO₂固定量を年齢（樹級）の推

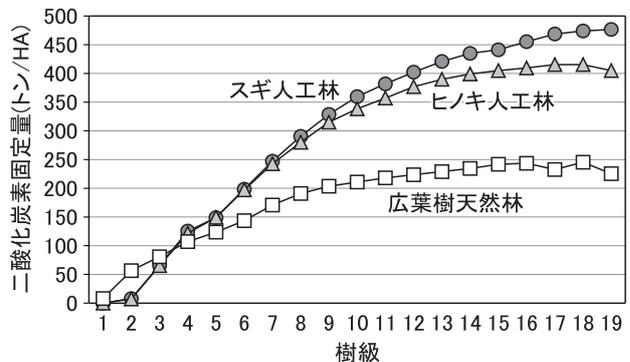


図13 樹級と樹種別二酸化炭素固定量の推移 (筆者計算&図作成)

表3 森林の林齢別平均林材積 (m³/ha)⁸⁾

樹 齢	16～ 20年	31～ 35年	36～ 40年	51～ 55年	76～ 80年	86～ 90年
スギ人工林	111	279	328	431	514	535
ヒノキ人工林	84	208	240	306	351	356
広葉樹天然林	53	94	105	120	134	135

※各樹種の材積は、林野庁「森林資源現況調査」に基づく

表4 樹種別1本あたりの年間CO₂吸収量

樹 齢 (年)	30～35 (kg/年)	36～40 (kg/年)	吸収量 (kg/年)	Haあたり 吸収量 (t)
スギ人工林	55	80	25	18
ヒノキ人工林	67	76	9	7
広葉樹自然林	27	40	13	9.5

※ ha (ヘクタール) あたり樹木を1,000本と仮定

移を、表3に材積量を示した。スギが最も成長が早いことがわかる。また、最初の20年の成長はやや遅いが、35～50年で最も早く、その後、次第に遅くなるのがわかる。また、材積の樹種の違いは、ヒノキはスギの7割強、広葉樹天然林は約3割程度であり、CO₂吸収としては「森林経営」の樹種としてスギが圧倒的に有利であることを示す。

一方、成長速度は、CO₂吸収量に反映されるが、表4に示すようにスギがヒノキや広葉樹の2倍程度の吸収量があることがわかる。

おわりに

海のCO₂吸収量を寄稿するにあたり、「前さばき」として森林の吸収量を取り上げた。京都議定書では、CO₂吸収源となる森林吸収源対策と農地管理・牧草地管理・都市緑化活動についてきめ細かく規定されており、上限値もあるので、森林等による吸収量を大きく増やすことはできないことがわかった。とくに、「森林経営」によるCO₂吸収が主となること、樹種としてスギ人工林が有効であることを明らかにした。なお、樹齢により森林は、CO₂吸収よりも排出が多くなり、つまり、排出源になりうることを紹介した。

とくに、生物由来のCO₂は発生量にカウントしないことは理解できるが、たとえば、アメリカやアマゾンの大規模な森林火災が発生するとCO₂を短期間に膨大に排出する。100年くらいのスパンであればいずれ森林や植物に吸収されて炭素が固定されるのであろうが、短期的にはかなり大気濃度に影響を及ぼすと考えざるを得ない。地球温暖化対策にも長期的な視点と短期的な視点で対応を講じるべきではないか？ 一度温暖化が進むと、ツンドラや海洋からメタンやCO₂が放出されるので、より深刻な事態が起こりうるのではないか？

CO₂の吸収量を調べた結果、海への溶解についてはまったく考慮されていないことがわかった。次回は、我が国だけの排出量や吸収量ではなく、地球全体としてのCO₂の循環について調べてみたい。

〈引用・参考文献〉

- 1) 地球温暖化に関する知識；気象庁 (2019.12)
- 2) 「温室効果ガスの種類」；国交省気象庁公式サイト
- 3) ここが知りたい地球温暖化 Q9. 水蒸気の温室効果；国立環境研究所 地球環境研究センター
- 4) バイオマス利活用で北海道を元気に；NPOバイオマス北海道
- 5) 日本の約束草案；平成27年7月17日 地球温暖化対策推進本部決定
- 6) 2018年度 (平成30年度) 温室効果ガス排出量 (確定値) について；環境省 (令和2年4月)
- 7) 資料3-2 農林水産分野における温暖化対策 森林による吸収源対策について；農林水産省
- 8) よくある質問；林野庁森林整備部森林利用課
- 9) すぐ使える図表集、1-2 温室効果ガスの特徴；全国地球温暖化防止活動推進センター
- 10) 森林による炭素吸収量をどのように捉えるか ～京都議定書報告に必要な森林吸収量の算定・報告体制の開発～；国立森林開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所