

1. 地球温暖化対策における 土木木材利用の課題と展望

外崎真理雄^{1*}・橋本征二²・沼田淳紀³・池田穰⁴・加用千裕²・村野昭人⁵

¹(独)森林総合研究所 木材特性研究領域 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)

²(独)国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³飛島建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

⁴株式会社間組 技術・環境本部 環境事業部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

⁵東洋大学理工学部 都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

* E-mail: tonosaki@ffjpri.affrc.go.jp

非枯渇性の循環型資源である木材の利用は、炭素貯蔵効果により二酸化炭素の隔離となり、エネルギー集約的材料を代替する省エネとなり、カーボンニュートラルなエネルギー源としての化石燃料の代替など、地球温暖化対策としての効果を有する。本企画セッションでは前世紀に種々の理由により木材需要が衰退した土木分野において木材利用の復興に関わる課題と展望を示す。本稿は、独立した6講演をまとめたもので、具体的には木材炭素貯蔵を評価することに関する考え方、土木工事における地中利用と斜面緑化、関連するものとして森林・建築分野における炭素貯蔵やエネルギー利用の効果について解説する。

Key Words : global warming, harvested wood products, ground improvement, slope tree planting method, woody biomass energy

1. 木材利用の炭素貯蔵効果と伐採木材製品評価の課題

人間社会に存在する木材製品ストック量を増加させることは、樹木が大気中から吸収した二酸化炭素を隔離することになり、森林蓄積量が増加することと同様に、二酸化炭素削減となる。これを木材利用の炭素貯蔵効果と称する。

この木材製品増加の過程では、エネルギー集約的材料の低加工エネルギー木材製品による代替が進むことによりエネルギー消費が減少し、エネルギー利用すべき木質残材量が増加することにより化石燃料代替も進む。

土木分野における年間木材製品需要は現在100万m³程度と推計され、建築分野の約2,500万m³と比べて桁違いに少ないが、逆説的には土木木材利用は大きな拡大ポテンシャルがあるとも言える。

京都議定書第一約束期間では、この木材炭素貯蔵効果は温室効果ガス削減勘定に入れないことになっているが、2013年以降の次期約束期間では評価対象としようという

動きで国際的議論が進んでいる。これは土木など今後木材製品を積極的に利用しようという消費者に、木材利用は温暖化防止に貢献しているというポジティブなメッセージを与えることになる。

しかし世界の工業用材の約1/3に当たる量が国際貿易されており、その国境を越えて移動する木材炭素をどの国の勘定に入れるかという評価システム境界が異なる3手法が提案されている。

これらの手法は輸出入材の取り扱いのみが異なっており、国産材を国内利用する場合はどれも同じ結果を与える。またグローバルな炭素収支を正しく評価しており、全世界の評価結果の和はどれも同じとなる。また次期約束期間では途上国が削減約束を負わないことなどから、炭素収支を正しく評価しないいくつかの新提案があるが、ここでは詳述しない。

蓄積変化法は、国産材・輸入材由来を問わず、その国内の木材炭素ストック変化量を、その国の評価結果とするものである。生産法では、その国の森林から生産された木材について、国内・輸出先国での変化量が結果とな

る。大気フロー法では、国産材・輸入材由来を問わず、その国で二酸化炭素排出された量が結果となる。

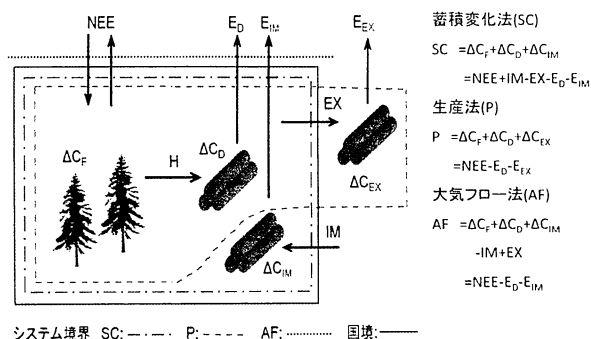


図-1 伐採木材の3評価手法

註 NEE: 森林の正味炭素吸収量、H: 伐採炭素量、ΔC: 炭素蓄積変化量、E: 炭素排出量、EX, IM: 輸出(入)炭素量、ΔC_EX, ΔC_IM: 炭素蓄積変化量、E_EX, E_IM: 森林、国内の国産材、輸出(入)材

かいつまんで言うと大気フロー法には大きな輸出インセンティブと大きな輸入ディスインセンティブがある。生産法は輸出インセンティブ、蓄積変化法は輸入インセンティブを与える。輸出インセンティブは材価を下げ、輸入インセンティブは上げる方向に働く。

世界の森林資源は偏在しており、国際貿易の振興により世界中の木材利用を拡大し、林業の経済的地位を高めることにより持続的林業を振興するためには、唯一輸入インセンティブを持つ、蓄積変化法の採用が望ましいと考える。

2. 伐採木材の取り扱いに関する土木学会の検討結果

(1) 検討の経緯

我々の経済社会に存在する伐採木材製品は、森林生態系とともに炭素の貯蔵庫としての役割を果たしている。国連気候変動枠組条約京都議定書では、特定の森林等吸収源活動(植林、再植林、森林減少、森林管理、耕作地管理、牧草地管理、植生回復)による炭素の固定を温室効果ガスの排出抑制・削減義務の達成に用いる、もしくは用いることができるとしているが、伐採木材製品による炭素の固定はこれらの活動には含まれていない。現在、京都議定書の第1約束期間が終わる2012年以降のルールに関して議論が進められているところであるが、伐採木材製品の取り扱いも論点の一つとなっている。

このような中、持続可能な形での木材利用促進の立場から、伐採木材製品による炭素の固定を温室効果ガスの排出抑制・削減義務の達成に用いることができるようにする提言を、複数の学協会(「伐採木材の取り扱い」に関する円卓会議。以下「円卓会議」)から政府に対して行うための協力要請が、日本木材学会から土木学会に対してなされた。土木学会では、本問題に関連を持つ専門家(本稿の執筆者ら)によって分野横断的な『土木学会

「伐採木材の取り扱い」に関する検討会』を臨時に構成して検討を行い、検討会としての意見書を取りまとめた。本発表では、この意見書の概要について報告する。

(2) 判断基準

伐採木材製品に関わる炭素の勘定方法には、蓄積変化法、生産法、大気フロー法などいくつかの方法があることから、伐採木材製品による炭素の固定を温室効果ガスの排出抑制・削減義務の達成に用いるためには、これらの勘定方法のいずれを採用すべきかを決める必要がある。このためには、各勘定方法を採用した場合の得失を明らかにしなければならない。

検討会では、まず、その得失を判断するための基準を明確にすることとした。我々が目指すべき方向は持続可能な森林管理と木質資源の利用であり、これらを促進することがその判断基準となるべきと考えた。これらを地球温暖化防止の観点から整理すると、以下の2つの判断基準及びその派生的な判断基準が設定できる。

- (1) 森林の炭素蓄積を、主に森林減少地域において減少させないこと、また、その他の地域においてはこれをしてできるだけ増加させること
 - (1a) 森林が豊富な国は、まず国内の森林をできるだけ使用し、輸入材を用いる場合は、輸出国の森林が保全されていること
 - (1b) 木製品のリサイクルと長期利用によって森林を保全すること
- (2) 森林の成長の範囲内で木材をできる限り利用し、エネルギー集約度の高い製品から木材に替えることによる省エネルギー効果と木材の炭素貯蔵効果、木材のエネルギー利用による化石燃料代替効果によって二酸化炭素の排出量を削減すること
 - (2a) マテリアルとしての利用を促進すること
 - (2b) 廃木材のエネルギー利用を適切に促進すること

(3) 検討結果の概要

検討会では、各勘定方法(現状のまま勘定しない方法、蓄積変化法、生産法、大気フロー法)の特徴を取りまとめるとともに、上記の判断基準をもとに以下のような意見をとりまとめた。

- ・木材利用、特にマテリアル利用を積極的に推進するという目的(2a)には蓄積変化法が適切である。蓄積変化法は輸入材の積極的な利用を推進することから、世界的な木材取引を活性化させ、森林管理のための資金を森林にもたらす可能性がある(1)。
- ・一方、輸出国において適切な森林管理が担保されるかどうかについての懸念が存在する(1)。特に、排出抑制・削減義務を持たない途上国においては過剰伐採によって森林減少による排出増加の可能性もあ

る。また、日本が輸入材の利用をさらに促進し国内の森林を放置することが適当とは考えにくい(1a)。

- ・生産法は、蓄積変化法とともに森林保全(1)のインセンティブを現状より弱める可能性があり、大気フロー法は森林保全(1)を担保しない。
- ・現状でも木材利用のインセンティブはあるが、現状のままではこれをさらに推進していくインセンティブとはならない。しかし、森林保全(1)のインセンティブを最も持つとともに、上記の判断基準に対して負のインセンティブが最も少ない。

また、意見書では以上のような検討を踏まえ、仮に円卓会議が蓄積変化法を採用するよう提言する場合に留意すべき点を取りまとめている。

3. 木材の地中利用について

(1) はじめに

地球温暖化防止対策を進める上で、木材を利活用することが有利である。土木事業で木材を大量にかつ長期的に使用する方法として、筆者らは丸太を地中に打設し軟弱地盤対策とすることを考えてきた。ここでは、このときに課題となる丸太の耐久性と、丸太による炭素貯蔵効果について述べ、地中利用の有用性を示す。

(2) 地中における木材腐朽について

木材を土木工事に用いる場合の、最大の課題の一つが腐朽である。木材は、温度、水、空気の状態が適切になると腐朽する。これをもってして、全ての木材が腐朽してしまうかの如く取り扱い、木材の使用に消極的になっている印象を受ける。木材の耐久性について一部に誤解があることを以下の事例により示す。

泥炭地盤で26年間柵の支柱として用いられていた色丹カラマツの丸太では、地際より上では腐朽が進み断面が大きく欠損していたが、地際より数cmより深い位置では健全であった。

粘性土を主体とする地盤に 57～59 年間に存置された旧木橋の橋脚は、スギであった。丸太は、河川の水面以深であり、57～59 年間経過後も健全であった。杭と言えば松杭であるが、スギであっても地下水位以深では松杭と同様に耐久性があるといえる。

細粒分質砂の地盤の高架橋基礎に 82 年以上用いられていたカラマツ属とマツ属の丸太は、地下水位以浅であった。しかしながら、腐朽が進行していたのは杭頭部のせいぜい 30cm の範囲で、杭頭部で腐朽がほとんど進行していないものも認められた。丸太周辺が地盤で覆われたこのような環境においては、腐朽の進行は進んでもこの程度であり、地下水位以浅においても地盤内であれば腐朽の進行はかなり遅いものと考えられた。

115～116 年間、東京の霞ヶ関のシルト質砂の地盤に存置されていた丸太は、表面の一部に深さ 1cm 未満の腐朽が認められた。東京の地下水位は、1965 年(昭和 40 年)頃をピークに数 10m という規模で大きく低下し、これ以降に腐朽が進行したものと考えられる。しかしながら、丸太の内部は健全で強度も十分にあった。この場合においても丸太が地盤に覆われているところでは、40 年間(地下水位低下期間)で腐朽が進んでもせいぜい 1cm 程度の進行速度であることがわかった。

その他、構造物基礎の木杭と河川工事に使用された木材についての文献調査結果によれば、地下水位変動域下限以深の事例では、100%が健全であり、この内、29%はスギであった。さらに、地中の地下水位以深で数百年を超えて存知されていた丸太や木材が健全であった事例が多くあり、地盤中の地下水位以深では木材は数百年以上の耐久性があるといえる。地盤中の地下水位変動域以浅に存在する木材では、環境条件により腐朽する場合もあるので、これに対する考え方が今後の課題といえる。

(3) 丸太による地盤改良における炭素貯蔵量

丸太を軟弱地盤対策として用いた場合、丸太に炭素が長期固定されるが工事によっても二酸化炭素の排出がある。これを現場実験により比較した事例では、一般の工事では工事によって必ず二酸化炭素の排出となるが、丸太を地盤対策材として用いることで、工事による二酸化炭素排出量よりも丸太による炭素貯蔵量が上回り、工事自体が二酸化炭素削減に貢献することが明らかになった。この場合においても、材料を遠方から運搬した場合には二酸化炭素排出量が多くなり、地産地消が重要であることがわかった。

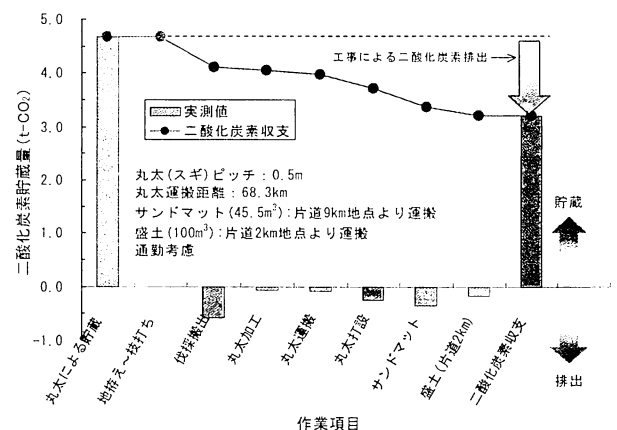


図-2 丸太による炭素貯蔵量と各作業における二酸化炭素排出量

(4) まとめ

木材を地中で利用することで、木材の欠点である腐朽について解決でき、工事を行った場合も炭素貯蔵効果が大きく、温室効果ガス削減に貢献することを示した。

4. ポット苗樹木による斜面緑化の経時変化

(1) はじめに

宮ヶ瀬ダムの骨材製造工事で生じた原石山法面は、急斜面の長大岩盤法面である。この法面に周辺の景観や環境と調和した緑化を行うため、現地自然植生に近い中高木等を植栽する工法（ハザマ式法面緑化工法、建設技術評価第95210号）で緑化した。施工は、1994年4月から1995年3月にかけて行われた。写真-1に見られるように施工後10年以上の期間、樹木は順調に生育しているように見られる。急斜面の長大岩盤法面という樹木にとって厳しい条件での成長状況を確認するため、施工6年後の2001年、更に6年後の2007年に再度調査を行い、成長率や二酸化炭素固定量を評価した。

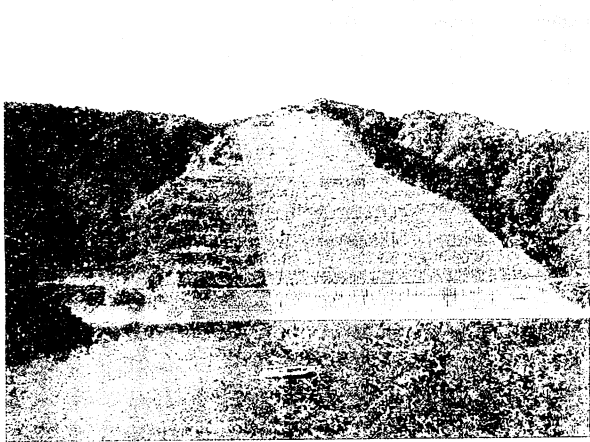


写真-1 宮ヶ瀬ダム原石山法面

(2) 現場概要と調査方法

当該法面は、標高295m～400mの勾配1：0.8の法面下部と標高400mの平坦部をはさみ、標高400m～490mの勾配1：1の法面上部に分かれる。法面下部は高度15m毎に幅4mの7個の小段、法面上部は高度7.5m 毎に幅2mの12個の小段をそれぞれ持つ。法面、小段に植栽した樹木は、落葉樹、常緑樹等総計7万本である。法面全体は、小段と排水路により、ブロックに区分けされており、全体の

5%にあたる3,500本ほどの樹木が含まれるように、任意の4つのブロックを選択し2001年に生存率、成長率等に関して標本調査を行った。それから6年後の2007年に4つのブロック内の255本の樹木について樹高、周囲長を測定した。これらの結果を受け、樹木の幹材積等から二酸化炭素固定量を評価した。

(3) 結果と考察

表-1に常緑樹、落葉樹の平均炭素量と法面全体での二酸化炭素固定量を示す。二酸化炭素固定量は、2001年の調査結果から各樹木の当初導入本数に対する生存率を50%と仮定してもとめた。これより樹木1本当たりの二酸化炭素固定速度を計算した。その結果、常緑樹では1995年～2001年の6年間で0.29kg CO₂/本/年、1995年から2007年までの12年間では、0.58kg CO₂/本/年となった。一方、落葉樹1本あたりの二酸化炭素固定速度は1995年～2001年の6年間で、0.48kg CO₂/本/年、1995年から2007年までの12年間では、0.82kg CO₂/本/年であった。成長率の相違を反映して二酸化炭素固定速度は、常緑樹より落葉樹の方が大きかった。

さらに法面の全面積48,000m²から植栽面積あたりの二酸化炭素固定速度をもとめると1995年～2001年の6年間で0.23kg CO₂/m²/年、1995年から2007年までの12年間では、0.43kg CO₂/m²/年となった。

5. 炭素ストック変化を考慮した木材のエネルギー利用による実質炭素収支について

(1) はじめに

地球温暖化対策のひとつとして木材のエネルギー利用による化石燃料代替効果が注目されている。しかしその一方で、木材の伐採によって森林における炭素ストックは長期的に変化することが予想され、その影響を考慮しながら今後どのように木材利用を図っていくかを戦略的に検討していく必要がある。そこで本研究では、木材の発電やバイオエタノールへの利用に着目し、化石燃料代

表-1 常緑樹、落葉樹の平均炭素含有量と法面全体での二酸化炭素固定量

樹木名		本数	サンプル数	樹木1本の平均炭素含有量(g)		法面全体でのCO ₂ 固定量(t)*	
				2001年	2007年	2001年	2007年
常緑樹	アラカシ	13731	42	553.7	2012.1	14.0	50.7
	アカガシ	7554	32	385.9	2534.7	5.3	35.1
	シラカシ	12351	85	496.0	1586.5	11.2	36.0
	ウラジログシ	3922	36	377.8	2053.0	2.7	14.8
	タブノキ	3203	8	324.6	844.2	1.9	5.0
	小計	40761	203	-	-	35.2	141.5
落葉樹	ヤマボウシ	1371	6	810.1	3211.2	2.0	8.1
	コナラ	6870	1	454.3	1792.9	5.7	22.6
	クリ	6180	15	1202.5	3603.4	13.6	40.9
	イヌシデ	4574	16	952.7	3177.6	8.0	26.7
	エゴノキ	3203	11	462.4	1818.4	2.7	10.7
	小計	22198	49	-	-	32.1	108.9
計		62959	252	-	-	67.3	250.4

替に伴う CO₂ 排出削減と森林における炭素ストック変化の双方を考慮した実質的な炭素収支を 2050 年まで推計した。ここでは、日本国内の森林面積全体の約 20%に相当する約 512 万 ha を積極的な資源利用を図る利用対象森林とした。

(2) 推計方法

2050 年までの人口と世帯数の推定値に基づいて住宅用・製紙用木材の需要を予測し、利用対象森林においてそれら木材の生産面積を推定した上で、残りの森林をエネルギー用木材として利用することを想定した。その際、エネルギー利用を行わず既存の森林を保全する(FP)、従来樹種を 45 年や 30 年の周期で植林・伐採しながらエネルギー利用を行う(CT-45、CT-30)、既存の森林を段階的に初期成長の早い早生樹種へ転換し、10 年の周期で植林・伐採しながらエネルギー利用を行う(FT-10)、といったシナリオを設定し、エネルギー用木材生産量(図-3)と利用対象森林における炭素ストック量(図-4)を推計した。また、木材の発電やバイオエタノールへの利用のライフサイクルにおける化石燃料消費由来の CO₂ 排出量を算定し、天然ガス発電やガソリンとの代替による CO₂ 排出削減量を評価した。

(3) 推計結果

利用対象森林における炭素ストック量の推移(図-4)を見ると、エネルギー用木材の生産を行わないFPシナリオでは、炭素ストック量が徐々に増加し2050年に2005年の約1.4倍になるが、エネルギー用木材の生産を行うCT-45、CT-30、FT-10シナリオでは、炭素ストック量が長期的に減少した。エネルギー用木材のバイオエタノール利用によるCO₂排出削減効果(図-5)において、ガソリン代替による化石燃料削減に伴うCO₂排出削減量(図-5の点線)、森林における炭素ストック量の減少(FPシナリオ基準)を考慮すると、実質的なCO₂排出削減量(図-5の実線)は大幅に小さくなった。特に、従来樹種の植林・伐採を行うCT-45やCT-30シナリオでは、実質CO₂排出削減量は2050年まで常にマイナスとなった。一方、早生樹種の植林・伐採を行うFT-10シナリオでは、2025年以降に実質CO₂排出削減量が見込まれ、森林を保全するよりも効果が期待できることが分かった。また、発電利用によるCO₂排出削減効果(図-6)においても、実質的なCO₂排出削減量(図-6の実線)は大幅に小さくなったが、FT-10シナリオでは、2010年以降に実質的な削減が期待でき、バイオエタノール利用よりも削減効果は大きくなった。これらの結果から、木材利用による実質的なCO₂排出削減に向けて、炭素ストックの変化が与える影響を考慮することの重要性が示された。

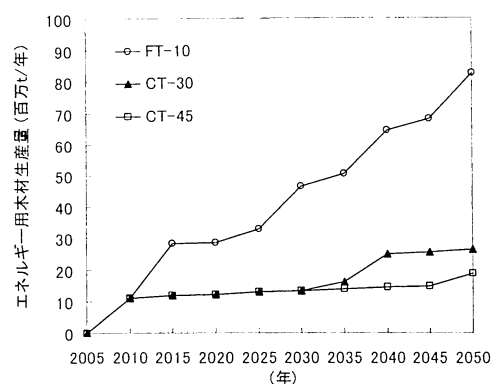


図-3 エネルギー用木材生産量の推移

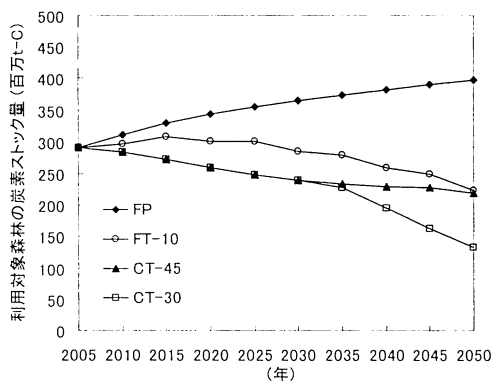


図-4 利用対象森林における炭素ストック量の推移

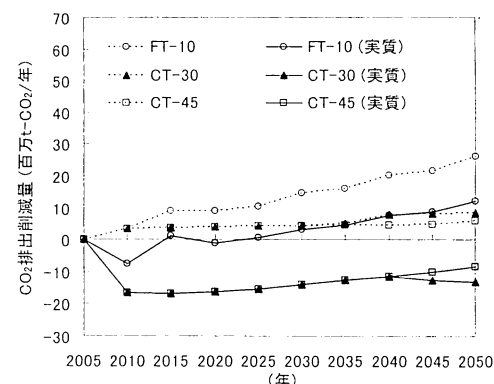


図-5 バイオエタノール利用による実質的なCO₂排出削減効果
(+ : CO₂排出削減, - : CO₂排出増加)

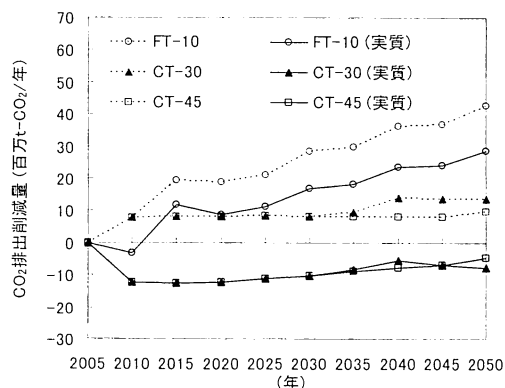


図-6 木質発電利用による実質的なCO₂排出削減効果

6. 木造住宅を対象とした木質資源循環によるCO₂削減効果の検討

(1) 木質資源循環によるCO₂排出量の算定システム

a) 木質資源のライフサイクル CO₂の評価対象

木造住宅に投入される木材のライフサイクル CO₂ を評価する上では、炭素固定効果、炭素吸収効果の取り扱いや、算定期間の設定等が大きく影響する。木材のライフサイクル CO₂ の評価対象のイメージを図-7 に示す。本研究では、木造住宅に用いられる木材が植林された時点から、住宅の解体直前までを評価対象とする。図中の①は、樹木の成長により炭素が吸収され、伐採されて建材となることで炭素が固定されることを示す。図中の②は、伐採と同時に、新たな植林を行うことによって、再び炭素吸収が始まることを示す。図中の③は、建材として固定された炭素が、構造物の運用期間中は固定されることを示す。図中の④は、建材として固定された炭素が、解体された後の焼却処理によって放出されるが、エネルギー回収を行うことによって、新規エネルギー代替効果が生じることを示す。この中で、①、③、④を合わせて評価することはダブルカウントとなるため、②、④を評価対象とする。

b) CO₂吸収による炭素固定効果・代替効果を含めた評価

木造住宅に投入される木材量を対象として、吸収期間別の平均炭素吸収量を算出する。その際、植林面積あたりの木材量として、林齢 60 年の人工林における幹材の蓄積量 378m³/ha を用いて、植林が必要な面積を算出した。植林面積の値に、面積当たりの CO₂ 吸収量推移のデータを乗じて、CO₂ 吸収量を求めた。なお、植林に必要なエネルギー量は考慮しない。

次に、木造住宅の運用期間を、30 年間と 60 年間に变化させた場合の、木材に由来するライフサイクル CO₂ を評価する。木材に吸収・蓄積された CO₂ は、建材として利用されることで炭素固定効果が発生するか、木材チップとして燃焼利用されることで重油代替効果が発生する。重油ボイラと木材チップボイラの熱効率率は同じと仮定し、木材チップと同熱量を有する重油を代替するとして、代替効果を算出する。

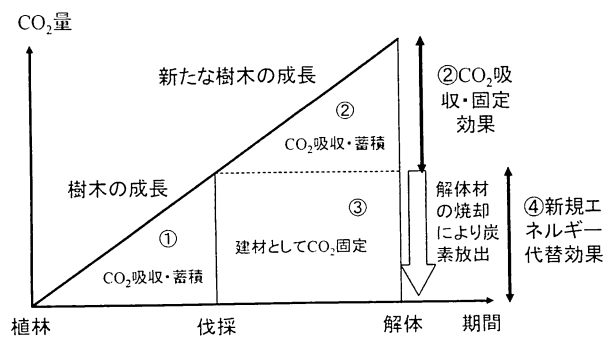


図-7 木材のライフサイクル CO₂ の評価対象

表-2 木材由来の CO₂ 評価におけるケース設定

	木質構造物の 運用期間	部材別の 植林から伐採までの期間		
		太	中	細
ケースA	30年	30年	30年	30年
ケースB	30年	30年	30年	10年
ケースC	60年	60年	60年	60年
ケースD	60年	30年	20年	10年

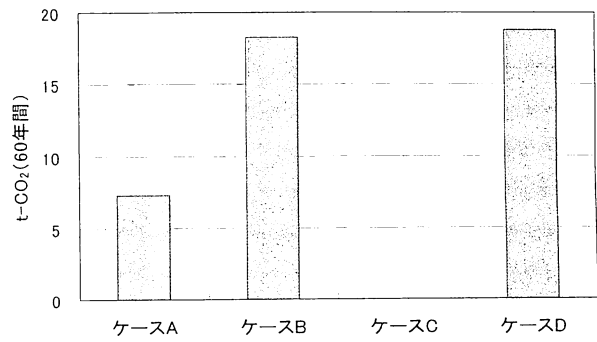


図-8 木造住宅における燃料代替効果
(60 年間、t-CO₂)

(2) 木造住宅に投入される木材由来のCO₂排出量の評価

本研究では、部材として必要な太さに成長するまでに必要な期間を考慮して、植林から伐採までの期間を表-2 のように設定する。運用期間よりも吸収期間が短い場合には、吸収期間が終了すると伐採して燃料代替として利用し、再度植林を行うとした。

木造住宅に投入される木材量を対象として、各ケースにおける 60 年間のエネルギー回収に伴う重油代替効果を算出した結果を図-8 に示す。ケース B、ケース D はケース A と比較して約 2.8 倍の代替効果が得られた。これは、植林から伐採までの期間が短いことによりエネルギー回収の対象となった木材量が増えたことによる。特に、細い部材については、短期間で伐採・植林を繰り返すため、代替効果が大きくなった。

(3) まとめ

本研究では、木造住宅を対象として、木質資源循環による CO₂ 削減効果を、炭素固定効果・燃料代替効果を含めて評価した。その結果、細い部材を対象として、短期間で伐採・植林を繰り返すことにより、約 2.8 倍の代替効果が得られることが分かった。