

木造建築物の長寿命化と持続的森林経営による地球温暖化緩和効果 Mitigation of Global Warming Based on Long Service Life of Wooden Architecture and Sustainable Forest Management

天野 耕二
Koji AMANO

1. はじめに

日本の温暖化対策は森林吸収源への依存度が高く、第一約束期間(2008年～2012年)の温室効果ガス削減目標値である1990年比6%のうち3.9%を国内の森林による炭素吸収量によって確保する計画である¹⁾。松本ら²⁾は、各種林業統計を用いて1990年および2000年における国内の森林バイオマスによる炭素ストック量を推定し、この期間内の年間炭素吸収量を推計している。また、長期固定試験地22か所において間伐の有無が森林の炭素収支に与える影響を調査した事例も報告されている³⁾。天野ら⁴⁾は、第一約束期間における効率的な森林管理方法を検討しており、国内の育成林を対象とした下刈り・間伐等の施業の実施によって確保できる年間炭素吸収量を推計している。本研究では、2002年以後100年間の国内人工林を対象とした長期的炭素収支に基づいて木造建築物の長寿命化のために必要な種々の森林経営手法を評価し、持続的に多くの炭素吸収量を確保することができる経営手法を検討した。

2. 森林経営手法の設定

国内人工林を対象として5つのタイプの森林経営手法の実施を想定した。なお、国内人工林は、スギ・ヒノキ・マツ類・カラマツを対象樹種とし、これらの樹種で人工林面積の88%、蓄積量の94%を占めていることから⁵⁾、ほぼ人工林全体を対象としていることになる。

(1) 非伐採型

植栽、下刈り、間伐等の森林経営は行わず追加的・人為的活動が全く無い状態を想定した。

(2) 皆伐植林型

木材伐採時に広範囲の樹木を一斉に全部または大部分伐採する皆伐を行い、木材伐採後は伐採跡地へ植栽して次世代の樹木育成を行う経営手法であり、戦後の国内林業において実施されてきた従来型の経営活動を想定した。

(3) 弱択伐型

木材伐採時に皆伐を行わず樹木の一部を抜き伐りする択伐を行う経営手法であり、木材伐採後に植栽は行わないものとした。この経営手法は、大規模な伐採とその後の植栽、下刈り等の育成費用負担を避け、小規模な間伐および択伐収入に期待する現状の国内林業に近い経営活動を想定している。

(4) 短期二段林型

2 層以上の樹木の階層を有する複層林化を指向する経営手法であり、上層樹木と下層樹木が重複する期間を 10 年とし、皆伐植林型のように木材伐採後いったん無立木地となることを避け、更新時期だけを二段林でつなぐ経営活動を想定した。上層樹木の伐採時期の 10 年前に下層へ次世代の樹木を植栽し、その後上層樹木をまとめて伐採収穫するものである。

(5) 常時複層林型

樹木が単層になる期間が無く常に 2 層以上の階層で構成される複層林化である。上層樹木は皆伐ではなく択伐を行い、常に下層のどこかに植栽木があり、それを育成する管理が行われる経営手法を想定した。

施業計画は標準的な森林施業体系^{6),7),8)}を参考に設定したが、マツ類およびカラマツの弱択伐型施業体系が入手困難であったためスギの弱択伐型施業体系を採用することとした。また、一般的に、マツ類の複層林化はマツースギ型の複層林を指向することから⁶⁾、マツ類およびカラマツの短期二段林型、常時複層林型については次世代目からスギを植栽する施業計画を設定した。

3. 炭素収支推計手法と使用したデータ

(1) 炭素収支推計対象および評価方式

2002 年実績の森林資源統計⁹⁾を基礎データとして、2002 年以後 100 年間に国内人工林において 2. の各種森林経営手法を実施した場合の炭素ストック量の変化、年間炭素吸収量・排出量の推移および木材伐採量を推計した。ここで、森林による炭素収支は、生育している樹木の枝・葉・幹(地上部バイオマス)および根(地下部バイオマス)を合わせた植生バイオマスの成長に伴う炭素ストック量の変化を推計対象とし、枯死木、堆積有機物および森林土壌による炭素収支は対象外とした。また、伐採木材の取り扱いについては、京都議定書の第一約束期間(2008 年～2012 年)に適用される評価方式である IPCC Default Approach^{9),10)}を採用することとした。この評価方式は、森林を伐採した時点で伐採木材に含まれる炭素が全て大気中に排出されると評価する。なお、第二約束期間以降に採用される可能性がある新たな提案方式として、各国の国内の森林による炭素ストック量の変化と国内に存在する木材による炭素ストック量の変化の合計を評価する Stock-Change Approach、伐採木材においては各国の国内に存在する木材ではなく各国で生産された木材による炭素ストック量の変化をその生産国に帰属させて評価する Production Approach、各国の国内における大気との炭素吸収・排出の差し引きを評価する Atmospheric-Flow Approach の 3 つの評価方式が検討されている^{9),10)}。

(2) 幹材積による植生バイオマスストック量および木材伐採量の推計手法

推定には、森林資源統計⁹⁾から得られる林齢 5 年間(齢級)ごとの樹種別・地域別の幹材積人工林密度、樹高生長曲線から得られる樹木の齢級に対応した上層樹高、異なる木材伐採時期・本数伐採率・その後の植栽本数に対応可能な樹木成長量モデルである林分密度管理図¹¹⁾を使用した。林分密度管理図には、自然枯死を考慮した樹木成長を表す「自然枯死線」と樹木の

上層樹高を表す「等平均樹高線」が縦軸の幹材積密度と横軸の本数密度上に示されている。幹材積人工林密度と伐採齢級に対応した上層樹高を示す等平均樹高線の交点に基づいて、森林経営手法ごとに異なる本数伐採率・植栽本数によって等平均樹高曲線上を推移させ、その後の樹木成長量を自然枯死線によって予測し、5年ごとの幹材積密度の変化を推計した。これらに齢級ごとの人工林面積を乗じて2002年以後100年間における国内人工林の植生バイオマスストック量の経年変化を推定した。また、森林経営手法ごとの木材伐採量についても、密度管理図上に示されている「等平均直径線」を用いて伐採時期ごとの木材胸高直径を推定し、胸高直径別の幹材積木材伐採量を算出した。これを幹材積から樹皮部分を除いた丸太材積へ換算するために、利用率0.77¹²⁾を乗じて直径別の丸太材積木材伐採量を求めた。

(3) 拡大係数・容積密度・炭素含有率

拡大係数は樹木の幹材積を枝・葉・根を含む植生バイオマス全体へ拡大する換算係数であり、福田ら^{13),14)}の推定値を引用して樹種ごと林齢ごとに異なる拡大係数を用いた。容積密度および炭素含有率は木材工業ハンドブック¹⁵⁾から引用し、容積密度はスギ0.32、ヒノキ0.34、マツ類0.41(アカマツの値を採用)、カラマツ0.44を用い、炭素含有率は樹種に関わらず一律0.50を使用した。

4. 炭素収支推計結果

(1) 炭素ストック量

国内人工林において各種森林経営手法を実施後100年における炭素ストック量の推移より、いっさいの森林経営活動を実施しない非伐採型では、木材伐採とその後の植栽による資源更新が行われなため、人工林全体の炭素ストック量は現状の約560百万t-Cから徐々に増加はするが60年経過前後に約1,100百万t-Cでほぼ均衡状態となった。また、小規模な択伐を行い伐採後の植栽を想定しない弱択伐型では、現状の炭素ストック量560百万t-Cから大きな増減はなく670百万t-C前後で推移する。一方、大規模な皆伐を行い伐採後に伐採跡地へ植栽し次世代の樹木育成を行う皆伐植林型では、炭素ストック量に経年変動があることが確認された。さらに、植栽後に上層樹木を皆伐して更新時期だけを複層林化する短期二段林型では、炭素ストック量の経年変動が極めて大きくなる。この経営手法は、各種経営手法の中で最も木材伐採量とその後の植栽量が多く、伐採による森林炭素ストックの減少(10年経過前後の約430百万t-C)と植栽後の樹木成長による炭素ストックの増加(100年経過前後の約1,180百万t-C)との格差が大きく、最大約2.7倍と推計された。また、上層樹木を択伐しながら下層樹木を植栽し常に森林を複層林化する常時複層林型は、炭素ストックの増加が著しく、50年経過時には現状560百万t-Cの2.3倍に相当する約1,290百万t-Cの炭素ストック量が見込まれる結果となった。1ha当たりの炭素ストック量は約140t-C/haとなり、現状の熱帯林の平均的な炭素ストック量約120t-C/ha¹⁶⁾と同程度である。また、50年経過以降も炭素ストック量は増加し続け、100年経過時には約2,050百万t-Cと推計されたが、森林内の炭素ストック可能量について今後検討する必要があると考えられ、

100年経過以降の超長期的には施業計画に課題が残るといえる。

(2) 木材伐採量

木材伐採を行わない非伐採型を除いた各種経営手法ごとの年間木材伐採量(丸太材積)の推移より、皆伐と植栽を行う皆伐植林型および短期二段林型は、伐採時期の集中する期間に多くの木材伐採量が予想された。特に短期二段林型では、40年経過前後、70年経過前後および100年経過前後における木材伐採量が約200百万 m^3 と推計され、現状(2002年)の日本国内の総木材供給量⁵⁾約90百万 m^3 の2倍以上に相当している。また、皆伐植林型、短期二段林型および常時複層林型は、現状(2002年)の国産材供給量⁵⁾約16百万 m^3 を上回る木材供給が可能であるが、現状の森林経営に近い弱択伐型においては、徐々に木材伐採量が減少し40年経過以降は現状の国産材供給量約16百万 m^3 を下回ることが予想される。

(3) 年間炭素吸収量・排出量

5年間隔の炭素ストック変化量から年間炭素吸収量・排出量(年間の炭素ストック変化量)を算出した結果、IPCC Default Approachでは、木材伐採量が樹木成長量を上回る年において、森林は炭素吸収源ではなく炭素排出源と評価されることとなる。したがって、木材伐採時に大規模な皆伐を行う皆伐植林型および短期二段林型において伐採時期の集中する期間は、炭素吸収量ではなく炭素排出量がカウントされる。特に短期二段林型では、最大約28百万 $t-C/year$ (35年経過前後)の年間吸収量と評価される時期から、最大約34百万 $t-C/year$ (70年経過前後)の年間排出量と評価される時期までその変動は極めて大きい。一方、非伐採型は、毎年徐々に年間吸収量が減少し、弱択伐型の場合では、年間吸収量がほとんど見込めない。したがって、非伐採型および弱択伐型は持続的に炭素吸収機能を維持することができない森林経営手法といえる。国内人工林の現状に近い弱択伐型の経営活動が今後も実施された場合、森林の炭素吸収機能は十分発揮されないと考えられる。各種経営手法の中で持続的に炭素吸収量を確保できるのは常時複層林型の森林経営手法と推定された。経年変動があるが100年間を通して炭素排出量とカウントされる時期はなく、年間炭素吸収量が最大約30百万 $t-C/year$ で推移する期間(30年経過前後から50年経過前後)が確認された。また、50年間における年間平均吸収量は約17百万 $t-C/year$ であり、1990年時の国内総二酸化炭素排出量の約6%に相当している。これは、京都議定書の第一約束期間における森林炭素吸収量の目標値13百万 $t-C/year$ を大幅に上回る吸収量である。今後中長期的に最も有望な森林経営手法と考えられる。さらに、100年間を通じた年間平均吸収量も約16百万 $t-C/year$ と高水準であることが確認されたが、4.(1)において述べた森林内の炭素ストック可能性を考慮すると、超長期的には検討の余地がある森林経営手法と考えられる。

5. 炭素吸収機能を考慮した森林の経済的評価

木材生産による森林経営収支を試算した上で、炭素吸収機能を考慮した観点から森林の経済的評価を行った。

(1) 森林経営収支と使用したデータ

森林経営手法ごとの木材生産による経営収支を算出した。なお、対象期間は 2002 年以後 100 年間とし、価格や費用はこの期間中一定と仮定した。また、割引率は考慮しなかった。

a) 木材販売収益

3. (2)において森林経営手法ごとに推計した樹種別・直径別の丸太材積による木材伐採量に樹種別・直径区分ごとの 2004 年時丸太市場価格¹⁷⁾を乗じて木材販売収益を算出した。

b) 木材伐採・搬出・運搬費用

梅田ら¹²⁾の試算値を引用した丸太 1m³ 当たりの伐採・搬出・運搬費用に、3. (2)の丸太材積木材伐採量を乗じて木材伐採・搬出・運搬費用を算出した。

c) 育林費用

森林経営手法ごとの標準的な森林施業体系^{5),6),7)}を参考に樹種別育林作業工程(地ごしらえ・植栽・下刈り・枝打ち)を想定した上で、各育林作業に要する費用が公表されている都道府県庁(福島県、静岡県、京都府、三重県、島根県、宮崎県)の平均値に基づいて 1ha 当たり育林費用を設定し、樹種ごとの人工林面積を乗じて森林経営手法ごとの育林費用を算出した。現状の森林経営者は、木材伐採期に至るまでの育林期間において育林費用に対する木材伐採収入が見込めない。このため、国および地方自治体によって地ごしらえ・植栽・下刈り・枝打ち等の育林作業に対する育林補助制度が実施されている。そこで、これら育林作業に要する費用に 68%¹⁸⁾の補助金を設定し、補助金を想定しない場合の育林費用と想定した場合の育林費用のどちらも試算することとした。

(2) 経営収支試算結果

(1)において算出した 100 年間を通した森林経営手法ごとの経営収支を、期間 100 年および対象人工林面積で除することにより 1 年間・1ha 当たりの森林経営収支を算出した。育林補助金を想定しない森林経営収支は、いずれの経営手法においても木材伐採期に至るまでの育林期間は収支が支出超過となった。しかし、100 年間を通した 1 年間・1ha 当たりの経営収支で評価すると、現在の森林経営の状況を想定した弱択伐型が最も高い収益を得る結果となり、皆伐植林型および常時複層林型では支出超過となった。一方、これら経営収支に育林補助金を含めた場合は、短期二段林型が最も収益が大きい結果となった。

ここで、現在、日本国内において本格的導入が検討されている国内排出権取引制度に着目する。この制度において森林経営活動によって吸収された二酸化炭素を排出権として取引市場で売買することが認められた場合、森林経営者は森林の二酸化炭素吸収量に応じた排出権売却利益を得ることができる。そこで、各種森林経営手法ごとの二酸化炭素吸収量に応じた排出権売却利益を試算し、現状の森林経営収支に排出権売却利益を含めた仮想的な経営収支を算出した。4.における森林経営手法ごとの 100 年間を通した炭素吸収量を 1 年間・1ha 当たりの二酸化炭素吸収量に換算した上で、排出権の市場取引価格を乗じることにより森林経営手法ごとの 1 年間・1ha 当たりの排出権売却利益を算出した。これを現状の森林経営収支に加えることにより排出

権売却利益を含めた仮想的な経営収支を算出した。なお、排出権取引価格については、環境省が実施した排出権取引試行事業¹⁹⁾(2003年12月～2004年6月)での平均取引価格が2,950円/t-CO₂、民間シンクタンクの模擬実験²⁰⁾(2002年9月～10月)での取引価格の推移が2,000～4,000円/t-CO₂と報告されていることから、ここでは、取引価格を3,000円/t-CO₂と設定した。

このような排出権売却利益を含めた仮想的な経営収支は、現状では支出超過となる常時複層林型において最も収益が大きくなる。短期二段林型も現状の収益の2倍以上となることが確認されたが、弱択伐型はあまり変化が見られなかった。また、現在実施されている国および地方自治体による育林補助制度と国内排出権取引制度の導入を比較すると、弱択伐型および常時複層林型において排出権売却利益を見込めば育林補助金と同等もしくはそれ以上の収支改善効果を示した。

(3) 森林経営と他の二酸化炭素削減施策の比較

森林経営に要する費用は、大気中の二酸化炭素を吸収するために要する費用すなわち森林経営活動という二酸化炭素削減施策の導入に必要となる費用と解釈することもできる。そこで、5.(2)の経営収支試算結果において現状の経営収支(育林補助金なし)が支出超過となる皆伐植林型および常時複層林型の森林経営活動に要する費用を二酸化炭素限界削減費用へ換算し、他の二酸化炭素削減施策による限界削減費用と比較した。

森林経営活動(皆伐植林型・常時複層林型)によって大気中から1tonの二酸化炭素を吸収するために必要な追加的費用すなわち限界削減費用は、皆伐植林型および常時複層林型各々の1年間・1ha当たりの費用を、皆伐植林型および常時複層林型各々と非伐採型(人為的活動が全く無い状態)との1年間・1ha当たりの二酸化炭素吸収量の差で除することにより求めた。しかし、皆伐植林型は非伐採型よりも年間平均吸収量が小さく評価されることから、皆伐植林型経営活動は、二酸化炭素削減施策と見なすことができないと判断し、常時複層林型経営活動のみ対象とすることとした。

二酸化炭素削減施策は村上ら²¹⁾の試算結果を引用し、エネルギー転換施策は今後想定される一次エネルギーの消費量構成比を基にここから天然ガスおよび新エネルギーの割合を増加させる施策が想定されている。省エネルギー施策は産業・家庭・業務の各部門における省エネルギー技術の普及がいくつかの見通しから想定されている。自動車交通施策はガソリンハイブリッド車・燃料自動車・電気自動車・天然ガス自動車の普及が想定されている。常時複層林型の森林経営手法は、上記の3種の二酸化炭素削減施策と比較すると1/15以下の費用負担で実施可能となることがわかった。これは、今後国および地方自治体等において種々の二酸化炭素削減施策の導入を検討する際、森林経営活動が費用対効果の高い二酸化炭素削減施策となる可能性を示している。

6. まとめ

本研究により以下の点が明らかになった。

①森林吸収源の取り扱いに関して、京都議定書の第二約束期間以降も現行の IPCC Default Approach (森林からの木材伐採を伐採時点で炭素排出と評価する方法) が採用される場合、日本国内の人工林では、常時複層林型だけが持続的に炭素吸収量を確保できる森林経営手法となり、現状の国内人工林の状況を想定した弱択伐型は持続的に炭素吸収機能を維持することができない経営手法であること。

②今後の本格的導入が検討されている国内排出権取引制度において、森林経営による二酸化炭素吸収量が排出権取引の対象として認められた場合、排出権売却利益を含めた森林経営収支は、弱択伐型および常時複層林型において現行の育林補助金と同等もしくはそれ以上の収支改善効果を示すこと。

③二酸化炭素を吸収するための森林経営活動は、他の二酸化炭素削減施策 (エネルギー転換施策、省エネルギー施策、自動車交通施策) を導入する際の限界削減費用と比較して 1/15 以下の費用負担で実施可能であること。

本研究では国内人工林を対象として種々の森林経営手法を評価したが、今後、伐採木材の焼却時もしくは生物分解時による炭素排出を含めた都市部等の木材消費分野に関わる炭素収支も評価対象とすることにより、森林経営および木材消費に関わる炭素収支を包括的に評価することが重要と考える。また、森林経営収支の試算において、100 年間を通した長期的な経営収支予測手法には課題が残っており、特に、木材伐採・搬出・運搬費用の見積もりは過小評価となっている可能性があるため、今後検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 地球環境保全と森林に関する懇談会資料, 2002
<http://www.env.go.jp/nature/biodic/shinrin/kondan/01/mat03-2.pdf>
- 2) 松本光朗, 鹿又秀聡, 福田未来, 野田 巖: 日本の炭素吸収量とその分布, 森林総合研究所研究成果選集, Vol.2001, pp18-pp19, 2002
- 3) 松本光朗, 細田和男: 長期にわたり計測された林分での異なる施業によるバイオマス成長量の変動評価に関する研究, 農林水産技術会議事務局研究成果, No.427, pp30-pp34, 2005
- 4) 天野正博, 広嶋卓也: 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, 地球環境研究総合推進費 平成 14 年度研究成果 中間成果報告集 2, pp171-pp180, 2003
- 5) 林野庁: 林業統計要覧, 2004
- 6) 藤森隆郎: 複層林マニュアル 施業と経営, 林野庁監修, 1997
- 7) 今田盛生: 森林組織計画, 九州大学出版会, 2005

- 8) 三重県庁: 森林施業体系図(スギ・ヒノキ),
<http://www.pref.mie.jp/RIKYOKYU/gyousei/hukyu/gijutsu/taikeizu.pdf#search>
- 9) UNFCCC : Estimation, Reporting and Accounting of Harvested Wood Products, FCCC/TP/2003/7, 2003
- 10) UNFCCC : Estimation, Reporting and Accounting of Harvested Wood Products, FCCC/TP/2003/7/Corr.1, 2003
- 11) 日本林業技術協会: 人工林林分密度管理図, 林野庁監修, 1999
- 12) 梅田三樹男, 辻 隆道, 井上公基: 標準功程表と立木評価, 日本林業調査会, 1982
- 13) 福田未来, 家原敏郎, 松本光朗: スギ、ヒノキにおける部位別現存量と林齢との関係, 日林関東支論 52, pp13-pp16, 2001
- 14) 福田未来, 家原敏郎, 松本光朗: アカマツ、カラマツにおける部位別現存量と林齢との関係, 日林関東支論 53, pp59-pp60, 2002
- 15) 林業試験場: 木材工業ハンドブック改訂 3 版, 丸善, 1982
- 16) IPCC: Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, 2004
- 17) 農林水産省: 木材価格, 2005
<http://www.maff.go.jp/toukei/sokuhou/data/mokukakaku2005-12/mokukakaku2005-12.xls>
- 18) 全国林業改良普及協会: 林業技術ハンドブック, 2001
- 19) 環境省: 平成 15・16 年度温室効果ガス排出量取引試行事業の成果について, 2004
http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mechanism/seika_zantei.pdf
- 20) 中村秀臣: 排出量取引の動向, エネルギー・資源, Vol.24, No.5, pp27-pp32, 2003
- 21) 村上正晃, 西本裕美, 松岡 譲: わが国における長期的な二酸化炭素削減の可能性についての研究, 環境衛生工学研究, Vol.18, No.3, pp95-pp100, 2004