

# 日本国内の木質資源利用による炭素貯蔵および CO<sub>2</sub>排出削減効果のフロー・ストック分析に 基づく評価

加用 千裕<sup>1</sup>・荒巻 俊也<sup>2</sup>・花木 啓祐<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 独立行政法人 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail:kayo.chihiro@nies.go.jp

<sup>2</sup>正会員 東洋大学教授 国際地域学部 国際地域学科 (〒112-0001 東京都文京区白山2-36-5)

E-mail:aramaki@toyonet.toyo.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京大学教授 工学系研究科 都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:hanaki@env.t.u-tokyo.ac.jp.

木質資源フローとストックを解析するモデルによって、エネルギー用木材の生産、バイオ燃料の普及、バイオマス発電の推進、木造住宅の増加、住宅の長寿命化といったシナリオによる炭素貯蔵効果と化石燃料削減によるCO<sub>2</sub>排出削減効果を2050年まで評価した。早生樹種によるエネルギー用木材の生産、バイオマス発電、住宅の長寿命化を想定するシナリオでは、森林と住宅の炭素貯蔵量は長期的に減少し、森林を保全するシナリオと比べて2050年に約14百万t/yearのCO<sub>2</sub>排出量増加となった。一方で、化石燃料削減によるCO<sub>2</sub>排出削減量が2050年に約61百万t/year見込まれ、実質的な炭素収支で見ると約47百万t/yearのCO<sub>2</sub>排出削減効果があり、炭素貯蔵よりも化石燃料削減を重視する方策の効果が大きいことが示された。

**Key Words :** net carbon balance, fast-growing tree, wooden house, power generation, bioethanol

## 1. はじめに

気候変動対策のひとつとして木質資源を活用する方策が議論されている。その気候変動緩和効果には、樹木が成長過程で吸収したCO<sub>2</sub>を森林や建築用木材などに貯蔵する炭素貯蔵効果や、木質資源を建設資材やエネルギー源として利用することによる化石燃料削減効果がある。

炭素貯蔵効果については、我が国の「京都議定書目標達成計画」では、温室効果ガス排出削減目標である1990年比6%のうち3.8%程度を国内の森林によるCO<sub>2</sub>吸収量で確保することとされており、適正な森林管理が重要課題とされている。CO<sub>2</sub>吸収および炭素貯蔵効果に関する既存研究として、森林および木材製品における炭素貯蔵量を最大化する管理方法を長期的に検討した研究<sup>1)</sup>、森林における樹木、土壌、枯死木および森林伐採後の木材製品、廃棄木材を対象として炭素貯蔵量や年間の炭素収支の変化を推定した研究<sup>2)</sup>、木材製品の炭素貯蔵量について複数の評価方式を比較した研究<sup>3)</sup>、複数の森林管理方法による国内人工林の長期的な炭素収支およびその経済性を分析した研究<sup>4)</sup>などが報告されている。

化石燃料削減効果については、「バイオマス・ニッポン総合戦略」において木質資源の製品およびエネルギー利用拡大による温室効果ガス排出削減が推進されている。木質資源利用による化石燃料削減効果に関する既存研究には、鉄骨造やコンクリート造といった非木造住宅を木造住宅と代替することによる建設資材生産時の省エネルギー効果に関する研究<sup>5)</sup>、木質ペレット、電力、液体燃料など複数のエネルギー利用方法によるCO<sub>2</sub>排出削減量および生産コストを比較評価した研究<sup>6)</sup>、原料生産からエネルギー変換利用に至るライフサイクルエネルギー収支およびCO<sub>2</sub>排出量を試算した研究<sup>7), 8), 9), 10)</sup>などの事例がある。さらに、エネルギー利用を目的とした森林資源の積極的活用を検討し、エネルギー用木材の生産ポテンシャルおよび化石燃料代替に伴うCO<sub>2</sub>排出削減効果を評価した研究<sup>11)</sup>がある。

しかし、森林や住宅などにおいて木質資源の貯蔵量を増やすことで得られる炭素貯蔵効果と、木質資源を製品やエネルギー源などに積極的に利用することで得られる化石燃料削減効果はトレードオフとなる可能性がある。そのため、木質資源の有効活用方策は、炭素貯蔵および

化石燃料削減の双方への影響を考慮しながら検討していく必要がある。そこで、著者らはこれまで、木質資源の炭素貯蔵効果および化石燃料削減効果の双方への影響を長期的に解析するモデルを構築し、国内の利用対象森林（「森林・林業基本計画」で規定されている木質資源の利用を目的とした約512万haの森林で森林面積全体の約20%）の管理、そこから生産される木質資源の住宅、製紙、エネルギー利用に関わる様々なシナリオによる気候変動緩和効果の評価を試みてきた<sup>12), 13)</sup>。

本研究では、前報<sup>12), 13)</sup>のエネルギー利用方策において課題としていた今後の技術進展を想定した木質発電およびバイオエタノールへの利用を新たに検討した上で、2050年までの木質資源フローおよびストックの変化を総合的に評価することによって、炭素貯蔵効果および化石燃料削減効果の双方を考慮した実質的な炭素収支を明らかにし、今後の森林管理および木質資源利用の望ましい方向性を検討する。

## 2. 木質資源利用のシナリオ

### (1) 森林管理シナリオ

国内の利用対象森林において、住宅用および製紙用木材の生産を行った上で、残りの既存森林を維持してエネルギー用木材の生産を行わないシナリオ（森林保全シナリオ）、既存の森林を徐々にエネルギー用に伐採しながらその跡地へ従来樹種（スギ、ヒノキ、カラマツ）を45年サイクルで植林および伐採しエネルギー用木材として利用するシナリオ（従来樹木45年シナリオ）、従来樹種を30年サイクルで植林および伐採しエネルギー利用するシナリオ（従来樹木30年シナリオ）、段階的に初期成長の早い早生樹種（ヤナギ、アカシア、カンバ、コジイ、ササ）へ転換し、10年サイクルで植林および伐採を行いエネルギー用木材として利用するシナリオ（早生樹木10年シナリオ）を想定した。

### (2) 住宅シナリオ

戸建住宅への居住の推進により木造住宅が増加するシナリオ（戸建増加シナリオ）、集合住宅への居住の推進により木造住宅が減少するシナリオ（集合増加シナリオ）、住宅の長寿命化により耐用年数が延長されるシナリオ（長寿命化シナリオ）を想定した。前報<sup>12), 13)</sup>と同様に、戸建増加シナリオは、2010年以降に毎年新築される住宅の戸建住宅比率が増加し、集合住宅比率が減少すると設定し、集合増加シナリオは、2010年以降の毎年の新築住宅の集合住宅比率が増加し、戸建住宅比率が減少すると設定した。また、長寿命化シナリオは、現状の住宅の平均耐用年数を戸建住宅が30年、集合住宅が50年と仮

表-1 エネルギー変換技術および変換効率

| エネルギー変換技術 |                | 変換効率 |
|-----------|----------------|------|
| 木質発電      | 直接燃焼蒸気タービン発電   | 0.10 |
|           | 熱分解ガス化ガスタービン発電 | 0.30 |
|           | 蒸気・ガス複合サイクル発電  | 0.50 |
| バイオエタノール  | 実測値            | 0.35 |
|           | 理論値            | 0.57 |

(GJ=power/GJ=wood, GJ=ethanol/GJ=wood)

定して、2010年以降に毎年新築される住宅の平均耐用年数をそれぞれ20年延長して戸建住宅が50年、集合住宅が70年と想定した。また、新築住宅における戸建住宅および集合住宅の比率や平均耐用年数が今後も現状のまま変化しないシナリオを現状維持シナリオとした。

### (3) 木質エネルギーシナリオ

エネルギー用木材および住宅廃木材を対象として、バイオエタノールおよび発電を行うシナリオを検討することとし、エネルギー変換技術とその効率<sup>14), 15)</sup>を表-1に示した。バイオエタノールについては、ガソリン燃料との代替利用を想定し、濃硫酸加水分解法による製造プロセスの実測値ケースと、エタノール製造時の各種収率を100%とする理論値ケースを設定した。発電については、実用段階にある直接燃焼蒸気タービン発電（直接燃焼発電）、実証段階にある熱分解ガス化ガスタービン発電（ガス化発電）、実験段階にある蒸気・ガス複合サイクル発電（複合発電）を対象とし、天然ガスおよび石炭による火力発電との代替利用を想定した。

## 3. 推計方法

### (1) 炭素貯蔵量

利用対象森林および住宅用木材における炭素貯蔵量の推計フローを図-1に示す。

#### a) 利用対象森林における炭素貯蔵量

前報B<sup>13)</sup>の推計方法により、2050年までの世帯数推定値に基づいて住宅シナリオ（現状維持、戸建増加、集合増加、長寿命化）における住宅用木材需要量を推計し、人口推定値に基づいて製紙用木材需要量を算定した。さらに、木材自給率が今後も2005年現在（住宅用：24%、製紙用：10%）のまま変化しないと仮定して2050年までの住宅用および製紙用国産木材生産量を算出した。この結果を用いて、利用対象森林における従来樹種の住宅用および製紙用木材伐採面積およびその後の植林面積を2050年まで推計した上で、その残りの利用対象森林を従来樹種あるいは早生樹種のエネルギー用木材植林面積と

想定し、毎年の植林面積を確保するための既存森林のエネルギー用伐採面積を算出した。住宅用木材（現状維持シナリオ）、製紙用木材、エネルギー用木材（従来樹種45年、従来樹種30年、早生樹種10年シナリオ）の植林および伐採面積の2050年までの推移を図-2に示した。各種シナリオによって変化する従来樹種および早生樹種の伐採および植林面積を用いて、式（1）により利用対象森林の炭素貯蔵量を算定した。

$$CF = \sum_s \sum_r \sum_a (AF_{s,r,a} \times v_{s,r,a} \times BEF_s \times D_s \times CC) \quad (1)$$

ここで、

CF：利用対象森林の炭素貯蔵量（t-C）

AF：利用対象森林面積（ha）

v：単位面積当たり幹材積（m<sup>3</sup>/ha）

BEF：拡大係数

D：容積密度（t/m<sup>3</sup>）

CC：炭素含有率（t-C/t）

s：樹種（従来樹種、早生樹種）

r：地域（北海道、東北・関東、中部・近畿、中国・四国、九州）

a：林齢

## b) 住宅用木材における炭素貯蔵量

前報A<sup>12)</sup>の推計方法により、住宅シナリオごとに2050年までの世帯数の推定値から住宅ストック床面積（図-3）を推算した。さらに、式（2）により住宅用木材の炭素貯蔵量を算定した。

$$CH = \sum_t \sum_c (AH_{t,c} \times h_{t,c} \times D \times CC) \quad (2)$$

ここで、

CH：住宅用木材の炭素貯蔵量（t-C）

AH：住宅ストック床面積（m<sup>2</sup>）

h：単位床面積当たり木材利用量（m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>）

t：建て方（戸建、集合）

c：構造（木造、非木造）

## (2) 住宅に関わる化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量

住宅の建設（建設資材生産、輸送）および運用（暖房、冷房、給湯、厨房、冷蔵庫、娯楽情報、家事衛生、照明）を対象として化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量を算定した。前報A<sup>12)</sup>の方法によって算出した建設および運用に関わる床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量（kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>）（図-4）に住宅シナリオごとの2050年までの新築住宅および住宅ストック床面積（m<sup>2</sup>）を乗じることにより住宅に関わるCO<sub>2</sub>排出量（t-CO<sub>2</sub>）を算定した。

## (3) 木質エネルギーに関わる化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量

### a) エネルギー用木材生産量

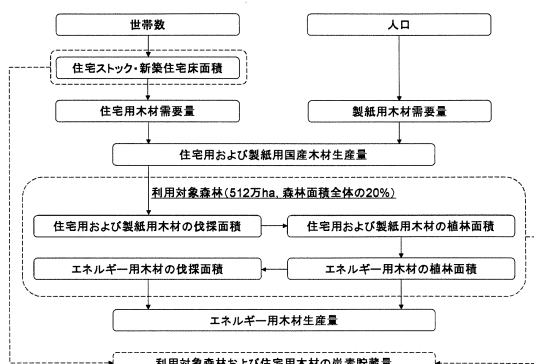


図-1 利用対象森林および住宅用木材における炭素貯蔵量の推計フロー

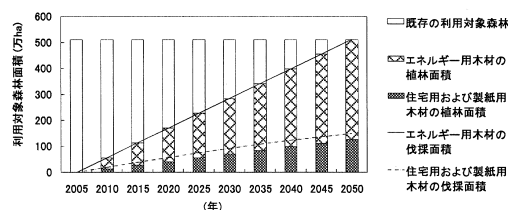


図-2 利用対象森林における住宅用、製紙用、エネルギー用木材の植林および伐採面積の推移

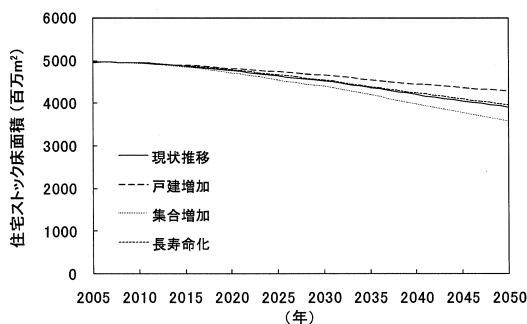


図-3 住宅ストック床面積の推移

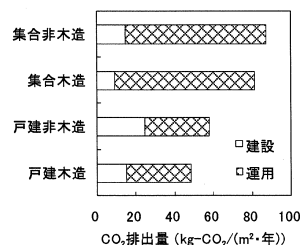


図-4 住宅の建設および運用に関わる床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量

式（3）により森林管理シナリオごとの2050年までのエネルギー用木材生産量を推計した。

$$We = \sum_s \sum_r \sum_a (AeF_{s,r,a} \times v_{s,r,a} \times BEF_s \times D_s) \quad (3)$$

ここで、

$We$ : エネルギー用木材生産量 (t)  
 $AeF$ : エネルギー用木材の伐採面積 (ha)

#### b) 住宅廃木材発生量

前報A<sup>12)</sup>の推計方法を用いて、2050年までの新築住宅および解体住宅床面積を推算し、式(4)および式(5)により住宅廃木材発生量を推計した。

$$Wwb = \sum_t \sum_c (AB_{t,c} \times b_{t,c} \times D) \quad (4)$$

ここで、

$Wwb$ : 新築時廃木材発生量 (t)

$AB$ : 新築住宅床面積 (m<sup>2</sup>)

$b$ : 単位面積当たり新築時廃木材発生量 (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

$$Wwd = \sum_t \sum_c (AD_{t,c} \times h_{t,c} \times D) \quad (5)$$

ここで、

$Wwd$ : 解体時廃木材発生量 (t)

$AD$ : 解体住宅床面積 (m<sup>2</sup>)

#### c) バイオエタノールおよび電力生産量

エネルギー用木材生産量 (t) および住宅廃木材発生量 (t) に発熱量 (GJ-wood/t-wood) およびエネルギー変換効率 (GJ-ethanol/GJ-wood, GJ-power/GJ-wood) (表-1) を乗じることによりバイオエタノール生産量 (GJ-ethanol) および電力生産量 (GJ-power) をそれぞれ算出した。

#### d) 化石燃料消費削減に伴うCO<sub>2</sub>排出削減量

バイオエタノール利用に関わる化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量の算定対象および結果を表-2に示した。前報A<sup>12)</sup>と同様に、植林および伐採、木材輸送、エタノール製造の各ライフステージを対象とし、化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量を算定した。なお、エタノール発酵残渣をボイラーで燃焼させて製造プロセス内の熱回収を行うことを想定した。また、代替対象であるガソリンに関わるCO<sub>2</sub>排出量 78.4 (kg-CO<sub>2</sub>/GJ-gasoline) (採掘、海上輸送、精製、国内輸送、燃焼)<sup>10)</sup>との差からバイオエタノールのガソリン代替利用に伴うCO<sub>2</sub>排出削減量を算出した。

電力利用に関わる化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量の算定対象および結果を表-3に示した。植林および伐採、木材輸送、発電の各ライフステージを対象とした。植林および伐採、木材輸送については、バイオエタノール利用と同様の算定方法を用いた。発電については、電動粉砕機を使用したチップ化による電力消費量を対象とし、原料となる木質資源のチップ化電力消費量 (GJ-power/t-wood)<sup>19)</sup>を電力生産量 (GJ-power/t-wood) から差し引いて自家消費を行うものと想定した。また、代替対象である天然ガスおよび石炭による火力発電は、将来的な発電技術の改善を考慮して2005年から2050年までの燃料の生産、輸送、燃焼に関わるCO<sub>2</sub>排出量を算出することとし、エネルギー変換効率およびCO<sub>2</sub>排出量の算定結果を

表-2 バイオエタノール利用に関わるCO<sub>2</sub>排出量

| ライフステージ           | エネルギー消費    | CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /GJ-ethanol) |      |
|-------------------|------------|------------------------------------------------------|------|
|                   |            | 実測値                                                  | 理論値  |
| 植林および伐採           | 林業機械の燃料消費  | 7.0                                                  | 4.4  |
|                   | 機械、燃料、苗木生産 |                                                      |      |
| 木材輸送              | トラックの燃料消費  | 6.5                                                  | 4.1  |
|                   | 燃料生産       |                                                      |      |
| エタノール製造           | 熱消費        | 52.4                                                 | 32.5 |
|                   | 電力消費       |                                                      |      |
|                   | 薬品生産       |                                                      |      |
| 合計                |            | 66.0                                                 | 40.9 |
| 合計 (エタノール製造時の熱回収) |            | 37.8                                                 | 23.5 |

表-3 電力利用に関わるCO<sub>2</sub>排出量

| ライフステージ | エネルギー消費            | CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /GJ-power) |      |     |
|---------|--------------------|----------------------------------------------------|------|-----|
|         |                    | 直接燃焼                                               | ガス化  | 複合  |
| 植林および伐採 | 林業機械の燃料消費          | 28.0                                               | 8.6  | 5.1 |
|         | 機械、燃料、苗木生産         |                                                    |      |     |
| 木材輸送    | トラックの燃料消費          | 25.9                                               | 8.0  | 4.7 |
|         | 燃料生産               |                                                    |      |     |
| 発電      | 原料粉砕およびチップ化 (自家消費) | 0.0                                                | 0.0  | 0.0 |
| 合計      |                    | 53.9                                               | 16.6 | 9.8 |

表-4 天然ガスおよび石炭による火力発電のエネルギー変換効率およびCO<sub>2</sub>排出量

|           | 天然ガス火力 |       | 石炭火力  |       |
|-----------|--------|-------|-------|-------|
|           | 2005   | 2050  | 2005  | 2050  |
| エネルギー変換効率 | 0.41   | 0.55  | 0.41  | 0.48  |
| 燃料生産および輸送 | 22.8   | 17.0  | 5.3   | 4.6   |
| 燃料燃焼      | 120.7  | 90.0  | 220.9 | 188.7 |
| 合計        | 143.6  | 107.0 | 226.2 | 193.2 |

(エネルギー変換効率: GJ-power/GJ-natural gas, GJ-power/GJ-coal, CO<sub>2</sub>排出量: kg-CO<sub>2</sub>/GJ-power)

表-4に示した。燃料の生産および輸送については、天然ガスに 9.36 (kg-CO<sub>2</sub>/GJ-LNG) (採掘、液化、船積、海上輸送、国内輸送、気化) を引用し、石炭に 2.19 (kg-CO<sub>2</sub>/GJ-coal) (採炭、選炭、内陸輸送、海上輸送、国内輸送)<sup>17)</sup>を引用した。また、燃料の燃焼については、天然ガスおよび石炭の燃焼に伴うCO<sub>2</sub>排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/GJ-LNG, kg-CO<sub>2</sub>/GJ-coal)<sup>18)</sup>を引用した。これらの合計を火力発電の2005年における発電効率全国平均値41%<sup>19)</sup>で除することにより、2005年現在における電力生産量当たりCO<sub>2</sub>排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/GJ-power) を求めた。また、2050年における発電効率推定値 (天然ガス: 55%, 石炭: 48%)<sup>20)</sup>を用いて2050年におけるCO<sub>2</sub>排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/GJ-power) を算定した。さらに、これら化石燃料発電 (天然ガス、石炭) と各種木質発電シナリオ (直接燃焼、ガス化、複合) との差から電力利用に伴うCO<sub>2</sub>排出削減量を算出した。

## 4. 推計結果

### (1) 炭素貯蔵量

利用対象森林における炭素貯蔵量の2050年までの推移を図-5に示した。エネルギー用木材の伐採および植林を

行わず既存森林を維持する森林保全シナリオでは、炭素貯蔵量は2005年の約291百万tCから2050年の約397百万tCへ約1.4倍に増加した。ただし、その増加率は徐々に減少しており2050年より後も同様の傾向が継続されると予想され、いずれは飽和状態となると考えられる。これに対して、エネルギー用木材の伐採および植林を行うシナリオでは、炭素貯蔵量は長期に渡って減少する結果となった。早生樹木10年シナリオでは、2050年に約225百万tCとなり森林保全シナリオの約57%であった。従来樹木30年シナリオでは、2050年に約133百万tCとなり森林保全シナリオの約34%しかなく、シナリオの中で最も少なかった。

住宅用木材における炭素貯蔵量の2050年までの推移を図-6に示した。今後の住宅ストック床面積の減少に伴っていずれのシナリオにおいても炭素貯蔵量は減少する結果となった。現状推移シナリオでは、2005年の約131百万tCから2050年の約90百万tCへ約69%に減少すると推計された。しかし、戸建増加シナリオでは木造住宅が増加することから、炭素貯蔵量は現状推移シナリオよりも増加し、2050年には約108百万tCとなり、現状推移シナリオの約1.2倍になった。長寿命化シナリオの炭素貯蔵量は現状推移シナリオとあまり変化がなく、集合増加シナリオでは木造住宅の減少により炭素貯蔵量が最も減少し、2050年に約74百万tCになった。

## (2) 住宅に関わるCO<sub>2</sub>排出削減量

住宅の建設および運用に関わる化石燃料消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量の2050年までの推移を図-7に示した。今後の住宅ストックおよび新築住宅の減少に伴ってCO<sub>2</sub>排出量も減少し、現状推移シナリオでは2005年の約296百万t-CO<sub>2</sub>/yearから2050年の約229百万t-CO<sub>2</sub>/yearへ減少し約77%になると推計された。しかし、戸建増加シナリオでは2050年に約238百万t-CO<sub>2</sub>/yearになり、現状推移シナリオよりも増加する結果となった。木造住宅は非木造住宅よりも床面積当たりCO<sub>2</sub>排出量（図-4）が少ないが、戸建住宅の増加に伴う住宅総床面積（図-3）の拡大により、全体としてCO<sub>2</sub>排出量が増加し、CO<sub>2</sub>排出削減効果は期待できないことが分かった。一方、集合増加シナリオでは2050年に約228百万t-CO<sub>2</sub>/yearになり、現状推移シナリオよりも若干減少する結果となった。さらに、長寿命化シナリオにおいては2050年に約212百万t-CO<sub>2</sub>/yearと推計され、現状推移シナリオの約92%に減少する結果となりCO<sub>2</sub>排出削減効果が期待できることが確認された。

## (3) 木質エネルギーに関わるCO<sub>2</sub>排出削減量

森林管理シナリオにおけるエネルギー用木材のバイオエタノール利用に伴うCO<sub>2</sub>排出削減量を図-8に示した。なお、バイオエタノール変換効率に実測値ケースを用い

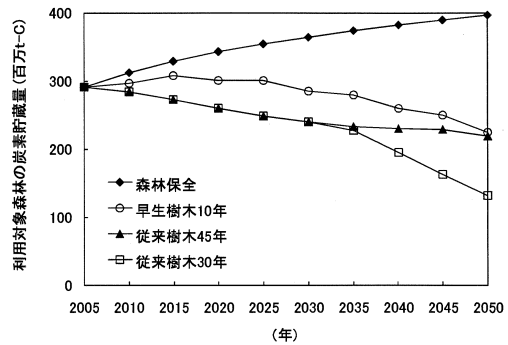


図-5 利用対象森林における炭素貯蔵量の推移

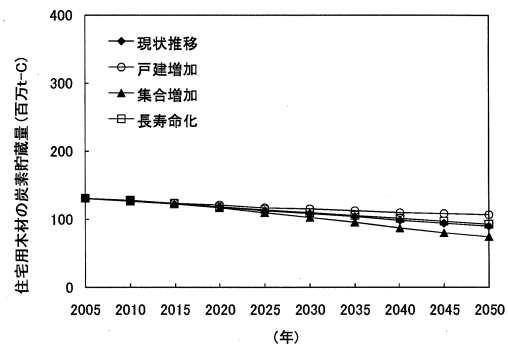


図-6 住宅用木材における炭素貯蔵量の推移

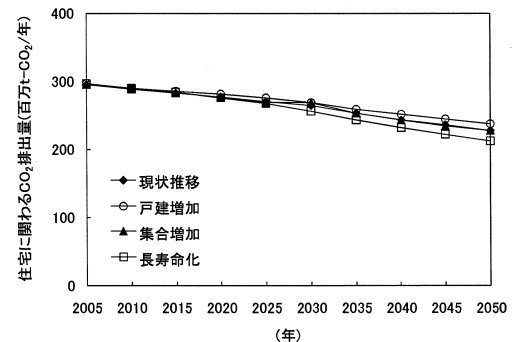


図-7 住宅の建設および運用に関わるCO<sub>2</sub>排出量の推移

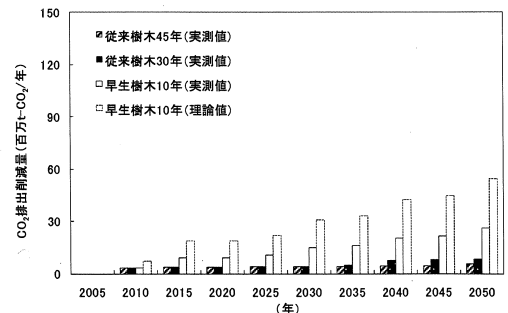


図-8 エネルギー用木材のバイオエタノール利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量の推移

た結果を示したが、早生樹木10年シナリオは理論値ケースの結果も示した。実測値ケースの従来樹木45年、従来樹木30年、早生樹木10年シナリオにおけるCO<sub>2</sub>排出削減量の違いは、それぞれのシナリオにおけるエネルギー用木材生産量が影響を与えている。早生樹木10年シナリオが最も多く2050年に約26百万t-CO<sub>2</sub>/yearと推計され、従来樹木30年シナリオが約8百万t-CO<sub>2</sub>/year、従来樹木45年シナリオが約6百万t-CO<sub>2</sub>/yearであり、それぞれ早生樹木10年シナリオの約32%、約23%だった。また、早生樹木10年シナリオにおける理論値ケースのCO<sub>2</sub>排出削減量は、実測値ケースの約2.1倍であり、最大で現状の2倍程度の技術改善効果が見込まれることが確認された。

早生樹木10年シナリオにおけるエネルギー用木材の電力利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量を図-9に示した。なお、天然ガス火力発電との代替による結果を示したが、複合発電は石炭火力発電との代替による結果も示した。天然ガス火力発電代替による2050年のCO<sub>2</sub>排出削減量は、直接燃焼発電が約8百万t-CO<sub>2</sub>/year、ガス化発電が約43百万t-CO<sub>2</sub>/year、複合発電が約78百万t-CO<sub>2</sub>/yearであり、各種発電技術のエネルギー変換効率の違いが影響している(表-1)。また、複合発電における石炭火力発電代替によるCO<sub>2</sub>排出削減量は、2050年に約147百万t-CO<sub>2</sub>/yearであり、天然ガス火力発電代替の約1.9倍に相当した。

早生樹木10年シナリオにおける2050年のバイオエタノールおよび電力利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量の比較結果を図-10に示した。バイオエタノール利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量は、直接燃焼発電よりも多く、ガス化発電および複合発電よりも少なかった。これらの結果から、今後の技術進展を考慮すると、電力利用はバイオエタノール利用よりもCO<sub>2</sub>排出削減のポテンシャルが大きいことが示された。

#### (4) 木質資源フロー・ストックおよび実質CO<sub>2</sub>排出削減効果

2005年現在における木質資源フロー(住宅用木材、住宅廃木材、製紙用木材)およびストック(利用対象森林、住宅用木材)の推計結果を図-11に示した。利用対象森林のストック量は約582百万t-wood(炭素貯蔵量は約291百万t-C)、住宅用木材のストック量は約262百万t-wood(約131百万t-C)であり、利用対象森林の約45%に相当した。また、住宅用木材需要量は約15百万t-wood/year、製紙用木材需要量は約14百万t-wood/yearであるが、そのうち国産木材は合わせて約5百万t-wood/yearであり、2005年において利用対象森林のストック量の約0.8%が木質資源フローとして住宅用および製紙用に利用されたことになる。

これに対して、利用対象森林の森林保全シナリオおよび住宅の現状推移シナリオによる2050年における木質資

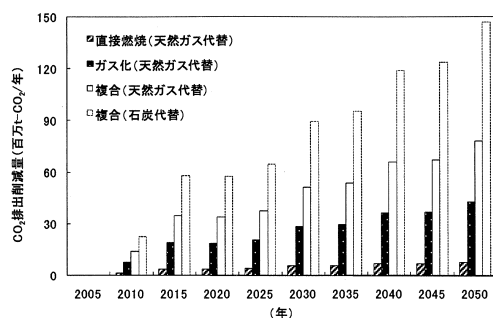


図-9 エネルギー用木材の電力利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量の推移

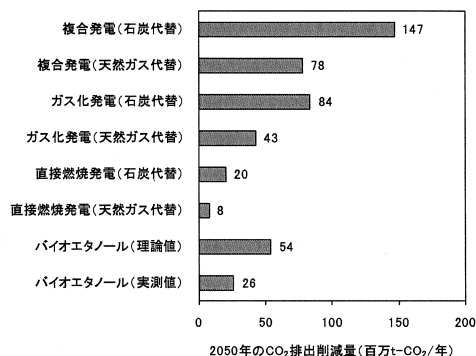


図-10 早生樹木10年シナリオにおける2050年のバイオエタノールおよび電力利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量の比較

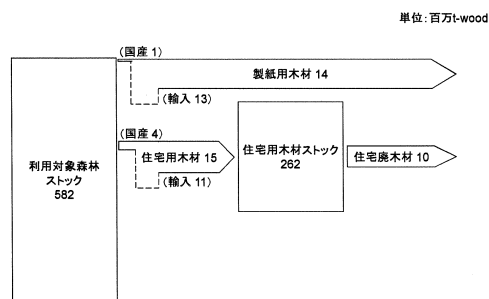


図-11 2005年現在における木質資源フローおよびストック

源フローおよびストックの推計結果を図-12に示した。利用対象森林のストック量は約794百万t-wood(約397百万t-C)、住宅用木材のストック量は約180百万t-wood(約90百万t-C)であり、利用対象森林の約23%と推計された。フローについては、住宅用木材、製紙用木材、住宅廃木材のいずれも減少する結果となった。住宅用木材需要量は約8百万t-wood/yearであり、2005年現在の約53%に減少した。製紙用木材需要量は約10百万t-wood/yearと

また、利用対象森林の早生樹木10年シナリオ、住宅の長寿命化シナリオ、木質エネルギーの電力利用シナリオによる2050年における木質資源フローおよびストックを図-13に示した。利用対象森林のストック量は約445百万t-wood（約225百万t-C）と推計され、エネルギー用早生樹種の植林および伐採によってストック量は減少し、森林保全シナリオの2050年（図-12）と比べると約57%しかなかった。また、長寿命化シナリオによって住宅用木材のストック量は約187百万t-wood（約93百万t-C）となり、現状推移シナリオの2050年（図-12）よりも若干増加した。利用対象森林の森林保全シナリオおよび住宅の現状推移シナリオ（図-12）を基準として、炭素貯蔵量の年変化を算定すると、2050年において約14百万t-CO<sub>2</sub>/yearのCO<sub>2</sub>排出量に相当する炭素貯蔵量が減少する結果となった。一方、住宅の長寿命化シナリオによって住宅用木材需要量および住宅廃木材発生量はともに減少し、現状推移シナリオ（図-12）の約63%および約67%になるが、その際に化石燃料消費削減によって約16百万t-CO<sub>2</sub>/yearのCO<sub>2</sub>排出削減量が見込まれる。さらに、利用対象森林において生産される約89百万t-wood/yearのエネルギー用木材と住宅廃木材をガス化発電による天然ガス火力発電代替として利用することにより、化石燃料消費削減に伴って約45百万t-CO<sub>2</sub>/yearのCO<sub>2</sub>排出削減量があった。住宅の長寿命化シナリオおよび木質エネルギーの電力利用シナリオによるCO<sub>2</sub>排出削減量から利用対象森林および住宅用木材における炭素貯蔵量の減少によるCO<sub>2</sub>排出量を差し引いて実質的な炭素収支を算定すると、2050年において約47百万t-CO<sub>2</sub>/year（=16+45-14）の実質CO<sub>2</sub>排出削減効果が得られることが分かった。

## 5. まとめ

・従来樹種や早生樹種によるエネルギー用木材の生産によって、森林の炭素貯蔵量は長期に渡って減少し、2050年に森林を保全する場合の3割～6割程度となる。

- ・戸建木造住宅の増加によって、住宅用木材の炭素貯蔵量は増加し、2050年に現状のまま推移する場合の約1.2倍になるが、住宅総床面積の増加に伴って化石燃料消費によるCO<sub>2</sub>排出量は若干増加する。

・バイオエタノール利用によるCO<sub>2</sub>排出削減量は直接燃焼発電（効率10%）よりも多く、ガス化発電（効率30%）および複合発電（効率50%）よりも少なくなる。

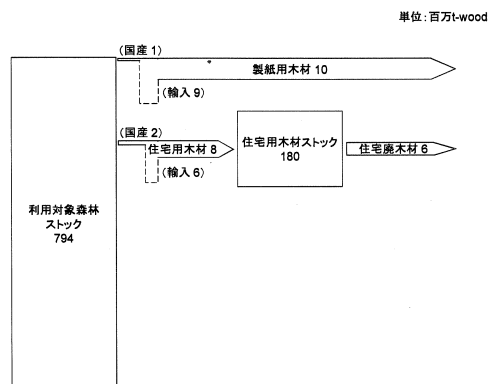


図-12 2050年における木質資源フローおよびストック（森林管理：森林保全、住宅：現状推移）

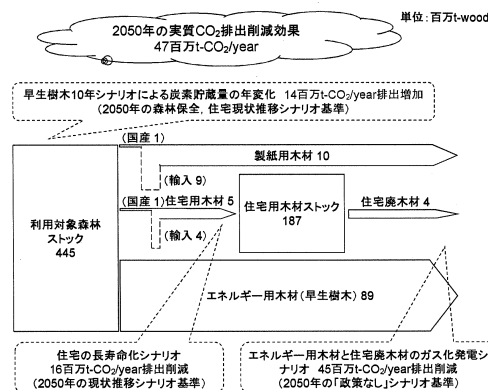


図-13 2050年における木質資源フローおよびストック（森林管理：早生樹木10年，住宅：長寿命化，木質エネルギー：ガス化発電による天然ガス発電代替）

バイオマス発電の推進、木造住宅の増加、住宅の長寿命化などの木質資源利用シナリオによる炭素貯蔵効果および化石燃料消費削減によるCO<sub>2</sub>排出削減効果を2050年まで評価した。得られた主な知見を以下に示す。

・実質的な炭素収支で見ると、炭素貯蔵効果よりも化石燃料削減効果を重視して木質資源を積極的に利用する方策によって、2050年に大きい気候変動緩和効果が得られる。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費 S-3-3「都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価」（代表：花木啓祐・東京大学教授）および日本学術振興会・科学研究費基盤研究（B）「地域スケールでのカーボンフローの解析と将来シナリオの評価」（代表：荒巻俊也・東洋大学教授）の支援により行われました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- Hennigar, C., MacLean, D. and Amos-Binks, L. : A novel approach to optimize management strategies for carbon stored in both forests and wood products, *Forest Ecology and Management*, Vol. 256, pp. 786-797, 2008.
- Woodbury, P., Smith, J. and Heath, L. : Carbon sequestration in the U. S. forest sector from 1990 to 2010, *Forest Ecology and Management*, Vol. 241, pp. 14-27, 2007.
- Hashimoto, S., Nose, M., Obara, T. and Moriguchi, Y. : Wood products: potential carbon sequestration and impact on net carbon emissions of industrialized countries, *Environmental Science and Policy*, Vol. 5, Issue 2, pp. 183-193, 2003.
- 加用千裕, 天野耕二, 島田幸司 : 長期的炭素収支に基づく日本国内の森林経営手法の評価, 環境システム研究論文集, Vol.34, pp. 235-243, 2006.
- 外崎真理雄, 恒次祐子, 小澤雅之, 花岡憲司 : 日本林業のための木材利用, 日本エネルギー学会誌 84, pp. 973-979, 2005.
- Wahlund, B., Yan, J. and Westermarck, M. : Increasing biomass utilization in energy systems: A comparative study of CO<sub>2</sub> reduction and cost for different bioenergy processing options, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 26, pp. 531-544, 2004.
- Farrell, A., Plevin, R., Turner, B., Jones, A., O'Hare, M. and Kammen, D. : Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals, *Science*, Vol.311, pp. 506-508, 2006.
- Pimentel, D. and Patzek, T. : Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower, *Natural Resources Research*, Vol.14, No. 1, 2005.
- Swanson, J. S. and Newton, A. C. : Mixtures of UK wheat as an efficient and environmentally friendly source for bioethanol, *Journal of Industrial Ecology* 9(3), pp. 109-126, 2005.
- Kim, S. and Dale, B. E. : Cumulative energy and global warming impact from the production of biomass for biobased products, *Journal of Industrial Ecology* 7(3-4), pp. 147-162, 2003.
- 加用千裕, 花木啓祐, 荒巻俊也, 石井暁 : 栽培系バイオマス由来のバイオエタノール活用による二酸化炭素排出削減ポテンシャルの推計, 第35回環境システム研究発表会講演集, pp. 19-26, 2007.
- 加用千裕, 荒巻俊也, 花木啓祐 : 木質資源フローに着目した温室効果ガス排出削減政策シナリオ評価フレームの構築, 土木学会論文集G, Vol. 64, No. 3, pp. 207-220, 2008.
- 加用千裕, 荒巻俊也, 花木啓祐 : 炭素ストック変化を考慮した森林資源のエネルギー活用による実質CO<sub>2</sub>削減効果の長期予測, 土木学会論文集G, Vol. 64, No. 4, pp. 336-346, 2008.
- NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) : バイオマスエネルギー高効率転換技術開発/セルロース系バイオマスを原料とする新規エタノール発酵技術等により燃料用エタノールを製造する技術の開発 平成15年度成果報告書, 2004.
- 木谷収 : バイオマス—生物資源と環境—, pp. 43, 2004.
- PEC (石油産業活性化センター) : 石油産業活性化センター 平成13年度成果報告書, 2002.
- PEC (石油産業活性化センター) : 石油産業活性化センター 平成10年度成果報告書, 1999.
- 環境省, 経済産業省 : 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver. 2.3, 第II編温室効果ガス排出量の算定方法, 2008.
- 日本電気協会 : 電気事業便覧 平成18年版, 2006.
- 藤野純一, 日比野剛, 梶原友樹, 松岡謙, 増井利彦, 甲斐沼美紀子 : 低炭素社会のシナリオとその実現の可能性, 地球環境, Vol. 12, No. 2, pp. 153-160, 2007.

## ESTIMATE OF CARBON STORAGE AND CO<sub>2</sub> EMISSION REDUCTIONS FROM USE OF WOOD RESOURCES IN JAPAN

Chihiro KAYO, Toshiya ARAMAKI and Keisuke HANAKI

We analyzed carbon storage in Japanese forests and wood in housing, as well as the CO<sub>2</sub> emission reductions from fossil fuel consumption by wood resource use between 2005 and 2050 under various scenarios, such as the production of wood for energy, bioethanol production, power generation, wooden

house increase, and housing service life extension. In 2050, the scenario of production of fast-growing trees for energy, electricity generation, and housing service life extension would increase CO<sub>2</sub> emissions by 14 million t/year as a result of the decrease in carbon storage, relative to forest preservation scenario. However, by reducing fossil fuel use it would reduce CO<sub>2</sub> emissions by 61 million t/year. Use of this wood instead of its preservation in forests therefore gave a net reduction in CO<sub>2</sub> emissions of 51 million t/year.