建築用木材の利用促進における 森林成長サイクルを考慮した CO₂ 収支の長期予測

LONG-TERM ESTIMATE OF CO₂ BALANCE CONSIDERING FOREST- GROWTH CYCLE IN PROMOTING THE USE OF CONSTRUCTION TIMBER

宇城拓平 — * 1 伊香賀俊治 — * 2
目黒康介 — * 1

Takuhei USHIRO — * 1 Toshiharu IKAGA — * 2
Kosuke MEGURO — * 1

キーワード：
木材利用期間, カーボンバランス, ライフサイクルアセスメント,
インベントリ分析, 森林管理

Keywords:
Wood utilization period, Carbon balance, Life cycle assessment,
Inventory analysis, Forestry management

In this study, we model the estimation of the CO₂ balance throughout the life cycle of construction timber. We study about construction utilization period considering forest-growth and show the long-term estimate of the emission reduction effect. As a result, it was found that CO₂ balance become plus (absorption) using Japanese cedar and cypress in Kochi Prefecture more than 50 years as construction timber. Moreover, as a result of long-term estimate, we show emission reduction effect by increasing the construction timber volume and extending the utilization period.

1. はじめに

京都議定書の CO₂ 削減目標の一部に、木材製品の CO₂ 蓄積効果を考慮することが COP17(第17回 気候変動枠組条約締約国会議)で決まるなど、木材製品の利用拡大による環境負荷低減に期待が高まっている。これまでは、CO₂ 吸収量の増加が見込まれる森林経営手法の検討¹⁾といった森林側のみの評価であったのに対し、近年では製紙や住宅等の木材利用方法毎に CO₂ 排出削減効果を評価した研究²⁾や、非木造住宅を今後木造住宅に代替した際の CO₂ 削減量の将来推計を行った研究³⁾、建築用木材生産における未利用材の有効活用に関する研究⁴⁾等の評価が報告されている。このように、木材は適切な森林管理により継続的な利用が可能となり、木材製品として積極的に利用することで CO₂ 排出抑制に貢献していることが示されている。しかし、日本における平成22年度の木材自給率は26%⁵⁾であり、戦後集中的に植林された人工林資源が伐採期を迎えているにも関わらず、森林から伐採搬出されないことが大きな問題となっている。そして、このままでは日本の森林において適切な森林管理が継続されず、森林荒廃につながる懸念される。以上のことから、これまでは政策実施による CO₂ 削減効果を評価した事例が多く、木材のライフサイクルを通じた評価を実施し、国産材利用促進の観点から具体的な木材利用方法について言及した研究は少ない。

そこで本研究では建築用木材を対象として、そのライフサイクルを通じた CO₂ 収支をモデル化する。これにより、森林成長サイクルを考慮した建築用木材の利用期間を検討すると共に、適切な伐採搬出による将来の CO₂ 排出削減効果を明示することを目的とする。

2. ライフサイクルを通じた CO₂ 収支のモデル化

2. 1 モデルの概要

図1 建築用木材の製造フローとシステム境界

表1 現地調査の概要

調査目的	高知県産材の CO ₂ 収支推計に必要なデータの収集
調査内容	原木や製材の輸送手段、距離、年間電力・エネルギー消費量、民有林収穫表 etc.
対象事業体	A 連合会(林業振興)、B 森林組合(森林施業・製造)、C 社(森林施業)、D 森林組合(森林施業)、E 共販所(原木販売)、F 森林組合(森林施業・製造)
データの収集期間	平成22年の実績値(F 森林組合以外) 平成23年4~8月の実績値(F 森林組合)

樹木の生長に伴う CO₂ 吸収量から木材の廃棄・焼却による CO₂ 排出量と木材生産における CO₂ 排出量を引くことで、ライフサイクルを通じた CO₂ 収支をモデル化した。本モデルの推計概要を図1に示す。また、本研究では森林率が全国で最も高く、表1に示す現地調査を実施できた高知県を対象として推計を実施した。対象樹種は高知県における素材生産量の90%を占めるスギ、ヒノキとした⁶⁾。

2. 2 樹木の生長に伴う CO₂ 吸収量の推計

森林における樹木の年間 CO₂ 吸収量を、「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」⁷⁾に記載されている炭素ストック量推計式を参考にし、炭素との重量比より 44/12 を乗じた CO₂ 吸収量推計式((1)式)を用いて推計した。

$$\Delta C = \Delta V \times D \times BEF \times (1+R) \times CF \times \sigma \quad (1)$$

¹⁾ 慶應義塾大学大学院理工学研究科 修士課程院生
(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)
²⁾ 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 教授・博士(工学)

¹⁾ Master Course Student, Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

²⁾ Prof., Dept. of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio Univ., Dr. Eng.

ΔC : 年間 CO_2 吸収量 [$\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{年}$]
 ΔV : 年間材積変化量 [$\text{m}^3/\text{年}$]
 D : 容積密度 [$\text{t} \cdot \text{d.m.}/\text{m}^3$]
 BEF : バイオマス拡大係数 [-]
 R : 地上部に対する地下部の比率 [-]
 CF : 炭素含有率 [$\text{t} \cdot \text{C}/\text{t} \cdot \text{d.m.}$]
 σ : CO_2 換算係数($44/12$) [$\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{t} \cdot \text{C}$]

スギ、ヒノキの材積は現地調査で得られた高知県の民有林収穫表のデータを用いた。しかし、それぞれのデータにおいて林齢 10 年以下のデータがなかったことから、リチャーズ曲線^{注 1)8)}にあてはめ、データを補完した。どちらの樹種の成長モデルも決定係数 R^2 は 0.9 以上であり、あてはまりはよいと言える。その結果を図 2 に示す。また材積変化量 ΔV 以外の各係数は、表 2 に示す「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」⁹⁾の値を引用した。

2. 3 木材の廃棄・焼却による CO_2 排出量の推計

(2)式より木材の廃棄・焼却による CO_2 排出量を推計した。素材生産、製材時に発生する端材、チップ等は、製品として長期間利用し続けるのではなく、エネルギー利用として短期間で消費されると想定し、発生した年に焼却すると仮定して CO_2 排出量を推計した。

$$C = V \times D \times \text{CF} \times \sigma \quad (2)$$

C : CO_2 排出量 [$\text{t} \cdot \text{CO}_2$]
 V : 材積 [m^3]
 D : 容積密度 [$\text{t} \cdot \text{d.m.}/\text{m}^3$]
 CF : 炭素含有率 [$\text{t} \cdot \text{C}/\text{t} \cdot \text{d.m.}$]
 σ : CO_2 換算係数($44/12$) [$\text{t} \cdot \text{CO}_2/\text{t} \cdot \text{C}$]

また、住宅等の長期間利用される木材製品の廃棄・焼却するタイミングは、「Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture」¹⁰⁾に記載されている残存量推計式((3)式)と年間廃棄量推計式((4)式)を用いて、各年の廃棄・焼却量を推計した。(3)、(4)式は、木材製品として利用された時点から、設定した半減期の減衰関数に基づいて廃棄・焼却されていくと仮定した式であり、本研究ではこの半減期を木材利用期間とした。木材製品が木造住宅に利用される場合を想定して、「CASBEE 戸建-新築」¹¹⁾における躯体の CO_2 計算条件の寿命を参考に、例として、木材利用期間を 30、60、90 年とした際の残存量率曲線を図 3 に示す。

図 2 各樹種における生長に伴う材積変化

図 3 各木材利用期間における残存量率曲線

$$C_{(n+1)} = e^{-k} \times C_{(n)} + K \times I_{(n)} \quad (3)$$

$$\Delta C_{(n)} = C_{(n+1)} - C_{(n)} \quad (4)$$

$C_{(n)}$: n 年開始時に木材製品として蓄積されている炭素量 [$\text{t} \cdot \text{C}$]
 $I_{(n)}$: n 年の間に木材製品として投入された炭素量 [$\text{t} \cdot \text{C}$]
 k : $\ln(2)/\text{半減期(年)}$
 K : $\{(1 - e^{-k})/k\}$

2. 4 木材生産における CO_2 原単位の推計

木材生産における各段階の CO_2 原単位を(5)式より推計した。単位物量あたりのエネルギー消費量は(1)森林施業、(2)製造、(3)輸送段階で推計した値を用い、エネルギー種別の排出係数は表 3 に示す参考文献 12)、13)、14)の値を用いた。

$$C_s = E_c \times E_f \quad (5)$$

C_s : CO_2 原単位 [$\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{m}^3$]
 E_c : 単位物量あたりのエネルギー消費量 [$\text{L}, (\text{kWh})/\text{m}^3$]
 E_f : エネルギー種別の排出係数 [$\text{kg} \cdot \text{CO}_2/\text{L}, (\text{kWh})$]

(1) 森林施業

下刈、除伐、間伐、主伐、人員輸送、作業道開設の工程におけるエネルギー消費量を原木搬出量で割ることで、単位物量あたりのエネルギー消費量を推計した(表 4)。エネルギー消費量と原木搬出量は、現地調査を実施した各事業体における年間の実績値を用いたことから、表 4 の値は 1 年間で平均化されたものであることに留意されたい。また、ここで人員輸送とは事務所から土場までの輸送であり、間伐、主伐工程には集材作業が含まれている。そして、各工程の CO_2 原単位を積み上げたものを森林施業段階の CO_2 原単位とした。

(2) 製造

原木市場における選木、敷地内輸送工程、製材所における粗挽加工、乾燥工程のエネルギー消費量を、それぞれの工程における取扱量 [$\text{m}^3/\text{年}$]で割ることで、単位物量あたりのエネルギー消費量を推計した(表 5、表 6)。エネルギー消費量と取扱量は、各事業体における年間の実績値を用い、乾燥工程における材種別の単位物量あたりのエネルギー消費量は、表 7 に示す現地調査で得られた乾燥スケジュールに基づいて、(6)式に従い推計した。そして、乾燥工程で使用される木質バイオマス燃料は、素材生産、製材時に発生する端材等を使用すると想定した。ここで、素材生産、製材時に発生する端材等を焼却した際の CO_2 排出量は、木材の廃棄・焼却による CO_2 排出量の

表 2 CO_2 吸収量推計に用いる各係数⁹⁾

	BEF [-]		R [-]	D [$\text{t} \cdot \text{d.m.}/\text{m}^3$]	CF [$\text{t} \cdot \text{C}/\text{t} \cdot \text{d.m.}$]
	≦林齢 20 年	>林齢 20 年			
スギ	1.57	1.23	0.25	0.314	0.5
ヒノキ	1.55	1.24	0.26	0.407	0.5

表 3 エネルギー種別の排出係数¹²⁾

	灯油	軽油	木屑 ¹³⁾	ガソリン	電力 ¹⁴⁾
	kg/L	kg/L	kg/kg	kg/L	kg/kWh
CO_2	2.645	3.004	0.000	2.883	0.326

表 4 森林施業段階の原木搬出量と単位物量あたりのエネルギー消費量

	B 森林組合		C 社		D 森林組合		F 森林組合		単位
原木搬出量	5,500		35,443		16,124		7,840		$\text{m}^3/\text{年}$
	軽油	GL	軽油	GL	軽油	GL	軽油	GL	単位
下刈	-※	0.07	-※	-※	0.04	-※	0.04	-※	L/m^3
除伐	-※	0.00	-※	-※	-※	0.04	-※	0.06	L/m^3
間伐	2.30	0.24	0.57	0.01	4.60	0.17	2.02	0.17	L/m^3
主伐	4.41	0.35	0.59	0.02	-※	-※	-※	-※	L/m^3
人員輸送	1.01	-※	-※	0.26	0.11	-※	-※	-※	L/m^3
作業道開設	-※	-※	0.61	0.00	2.55	0.07	0.17	0.01	L/m^3

※未実施もしくは未使用の値を表す、GL : ガソリン

推計において計上しているため、カーボンニュートラル^{注3)}とした。

$$E_c = E_i \times T_d / \Sigma(T_d \times V) \quad (6)$$

E_c : 単位物量あたりのエネルギー消費量 [L, (kWh)/m³]

E_i : エネルギー投入量 [L, kWh]

T_d : 乾燥時間 [h]

V : 材積 [m³]

(3) 輸送

「貨物輸送事業者に行わせる貨物の輸送に係るエネルギーの使用量の算定の方法の一部を改正する告示案」¹⁵⁾より引用した表8のt・kmあたりのエネルギー使用量に表9のスギ、ヒノキの気乾密度¹⁶⁾と表3の排出係数を乗じることで、輸送段階のCO₂原単位[kg-CO₂/m³・km]を推計した(表10)。また本研究では現地調査に基づき、7tトラックを利用するとした。

3. 森林成長サイクルを考慮した木材利用期間の検討

本モデルを用いて各樹種のライフサイクルを通じたCO₂収支を推計し、CO₂収支の観点から建築用木材の利用期間を検討した。

3. 1 条件設定

(1) 樹木の生長に伴うCO₂吸収量推計

森林経営手法は、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、戦後の国内林業において実施されてきた従来型の皆伐植林型¹⁾を想定した。対象森林面積は1haとし、各樹種の標準伐期(スギ:40年、ヒノキ:50年)¹⁷⁾に皆伐、新植を繰り返すと想定して推計した。標準伐期とは、「既往の平均伐期を勘案した平均成長量最大となる伐期齢の条件から、用材サイズに成長するのに要する最短の林齢を意味する」と森林大百科事典¹⁷⁾に記されていることから、CO₂吸収の観点からみた際に、最も効率の良い伐期であると考えられる。そのため、標準伐期による伐採を仮定した。

(2) 木材の廃棄・焼却によるCO₂排出量推計

図4にスギ、ヒノキのマテリアルフローを示す。図2における森

図4 スギ、ヒノキのマテリアルフロー

図5 スギ、ヒノキの生産フロー

林面積1haにおける標準伐期の幹材積分を搬出するとし、素材生産時の枝、葉、根の材積、製材時の端材等材積は(7)式、(8)式より推計した。また、(8)式の歩留まりは、幹材積に対する製材材積の割合を指し、現地調査等によって得られたF森林組合の値(58%)を用いた。

そして、製材材積を(3)式の”木材製品として投入された量”として入力し、(4)式より年間CO₂排出量を推計した。製材は木造住宅に利用すると想定し、「CASBEE 戸建-新築」¹¹⁾における躯体のCO₂計算条件の寿命を参考に、木材利用期間30年から10年ごとに100年まで設定して毎年のCO₂排出量を推計した。

$$V_b = V_a - V_t \quad (7)$$

$$V_l = V_t \times Y \quad (8)$$

V_b : 枝・葉・根等材積 [m³/ha]

V_a : 樹木全体材積 [m³/ha]

V_t : 幹材積 [m³/ha]

V_l : 製材材積 [m³/ha]

Y : 歩留まり [%]

(3) 木材生産におけるCO₂排出量推計

図5に示す生産フローに基づき推計した。原木輸送距離(森林から製材所)は、高知県内で原木取扱量が最大級のE共販所における現地

表5 製造段階(製材所)における単位物量あたりのエネルギー消費量

乾燥材の内訳	樹種	粗挽加工				乾燥					
		B森林組合		F森林組合		B森林組合			F森林組合		
		軽油	電力	軽油	電力	灯油	木屑	電力	灯油	木屑	電力
		L/m ³	kWh/m ³	L/m ³	kWh/m ³	L/m ³	kg/m ³	kWh/m ³	L/m ³	kg/m ³	kWh/m ³
ひき角材 ^{注2)}	スギ	-	-	1.26	54.35	-	-	-	44.82	97.03	62.44
	ヒノキ	-	-	-	-	-	-	-	27.58	59.71	38.43
ひき割材 ^{注2)}	スギ	-	-	1.26	54.35	-	-	-	34.47	74.64	48.03
	ヒノキ	-	-	-	-	-	-	-	27.58	59.71	38.43
板 ^{注2)}	スギ	0.18	73.00	1.26	54.35	0.18	373.33	84.30	27.58	59.71	38.43
	ヒノキ	-	-	-	-	0.18	373.33	84.30	-	-	-

表7 製造段階(製材所)における取扱量と乾燥スケジュール

乾燥材の内訳	樹種	粗挽加工		乾燥			
		B森林組合	F森林組合	B森林組合	F森林組合	乾燥時間	乾燥時間
		取扱量	取扱量	取扱量	取扱量	時間	時間
ひき角材 ^{注2)}	スギ	-	447	-	-	402	130
	ヒノキ	-	-	-	-	45	80
ひき割材 ^{注2)}	スギ	-	89	-	-	80	100
	ヒノキ	-	-	-	-	9	80
板 ^{注2)}	スギ	2,100	1,250	1,680	168	1,250	80
	ヒノキ	-	-	420	168	-	-

表6 製造段階(原木市場)における取扱量と単位物量あたりのエネルギー消費量

樹種	取扱量	E共販所	
		敷地内輸送	選木
		軽油	電力
スギ	m ³	L/m ³	kWh/m ³
	15,289	0.74	0.57
ヒノキ	m ³	L/m ³	kWh/m ³
	25,090	0.74	0.57

表8 貨物輸送あたりの燃料使用量¹⁵⁾

輸送の区分	最大積載量	貨物輸送あたりの燃料使用量[L/t・km]
トラック	6~8t未満	軽油:0.068

表9 スギ、ヒノキの気乾密度¹⁶⁾

樹種	気乾密度	単位
スギ	0.38	t/m ³
ヒノキ	0.44	t/m ³

表10 輸送段階(トラック)のCO₂原単位

樹種	トラック(6~8t未満)	単位
スギ	0.08	kg-CO ₂ /m ³ ・km
ヒノキ	0.09	kg-CO ₂ /m ³ ・km

調査で得られた搬入先、搬出先から、材積で重みづけすることにより平均値を推計して用いた。そして、製材輸送距離(製材所から消費地)は地産地消を想定し、高知県内に輸送されるとして「伐採木材の利用に係る炭素収支モデルの開発」¹⁸⁾より引用した(9)式を用いて推計した。森林施業、製材工場においてF森林組合を選択したのは、調査した中で材種毎に最も細かくデータが得られたためである。

$$D_t = 0.16 \times \sqrt{A} + 15 \quad (9)$$

D_t : 製材輸送距離 [km]
 A : 都道府県面積 [km²]

4) 各樹種のライフサイクルを通じたCO₂収支推計

樹種の生長に伴うCO₂吸収量、木材の廃棄・焼却によるCO₂排出量、木材生産におけるCO₂排出量において、それぞれ各樹種10サイクル目まで(スギ:400年、ヒノキ:500年)の総和より平均値を算出した。そして、樹木の生長に伴うCO₂吸収量の平均から木材の廃棄・焼却、木材生産におけるCO₂排出量の平均を引くことでライフサイクルを通じたCO₂収支を推計した。

3. 2 森林成長サイクルを考慮した木材利用期間の検討結果

図6に樹木の生長に伴うCO₂吸収量の推計結果を示す。スギとヒノキを比較すると、各林齢においてスギはヒノキよりCO₂吸収量が多いことが示された。また、CO₂吸収量が極大となる林齢付近で伐採できるスギの方が、CO₂吸収効率も良くなると考えられる。

次に、図7に木材製品の各利用期間(例:30, 60, 90年)における廃棄・焼却によるCO₂排出量推移を示す。木材利用期間が長い方が、木材製品が廃棄、焼却されてCO₂を排出するタイミングが遅いことから、ある一定期間で評価した際に、CO₂排出抑制効果が推計結果に反映されるということが示された。また、40年目においてCO₂排出量が増加するのは標準伐期に伐採搬出され、(3)式の”木材製品として投入された量”が増加するためである。

そして図8に木材生産におけるCO₂排出量を示す。製造段階のCO₂排出量が多いのは、F森林組合の乾燥工程における木質バイオマス燃料利用率が低く、化石燃料使用量が多いことに起因する。このことから、F森林組合において木材の乾燥に要する熱量を100%木質バイオマス燃料で賄うと仮定したケースを推計した。これにより、大幅にCO₂排出量が削減されることが示された。

以上の結果を基に推計したCO₂収支推計結果を図9に示す。現状ケースでは、どちらの樹種も木材利用期間を約85年以上に設定しなければ、CO₂収支がポジティブ(吸収)にならないことがわかった。これは樹木の生長に伴うCO₂吸収とその焼却によるCO₂排出のカーボンニュートラルだけでなく、生産に伴うCO₂排出量を計上していることの影響が大きいと考えられる。そこでF森林組合の乾燥工程における木質バイオマス燃料利用率を100%であると想定して推計すると、スギ、ヒノキ共に約50年以上の木材利用期間を設定することで、CO₂収支がポジティブ(吸収)になることがわかった。

4. 建築用木材利用促進における森林成長サイクルを考慮したCO₂収支の長期予測

木材利用期間の延長、木材の利用促進を考慮して、表11に示す3ケースに関してCO₂収支の将来推計を実施した。ケース②では木材利用期間を3.2で示した50年で設定することで木材利用方法の違いを比較すると共に、ケース③では高知県産材を全く使用しないケー

図6 各樹種幹材積のCO₂吸収量

図7 住宅に利用される木材製品の各利用期間における廃棄・焼却によるCO₂排出量推移(スギ)

図8 木材生産におけるCO₂排出量

図9 各樹種のライフサイクルを通じたCO₂収支推計結果

表11 将来推計において設定したケース

ケース	木材利用期間	木材利用量
① 現状ケース	30年	木造住宅の将来推計に従う
② 木材利用期間延長ケース	50年	木造住宅の将来推計に従う
③ 無伐採ケース	-	高知県産材を全く使用しないケース

図10 高知県における木造住宅数の将来推計結果

スを想定し、木材利用促進による将来のCO₂削減効果の比較を実施した。対象は高知県内で伐採され、利用される建築用木材とし、2100年までの将来推計を行った。また、本研究では今後の木材利用方法の検討を実施するため、2012年以降に伐採される樹木を対象に2100年までのCO₂収支を示した。

4. 1 高知県における2100年までの木材ストック量の将来推計

高知県の木造住宅に起因する木材ストック量を将来推計した。木材ストック量は(10)式に基づき推計した。住宅一棟あたりの延べ床面積は、「平成20年住宅・土地統計調査」¹⁹⁾における一戸建て、長屋建て、共同住宅の一棟あたり延べ床面積を、高知県における建て方別の住宅数で重みづけすることにより平均値を推計した。また延

べ床面積あたりの木材使用量は、「全国木材組合連合会 HP」²⁰⁾に記載されていた工法別木材使用量の値を「高知県の住宅着工状況」²¹⁾より引用した平成 22 年の工法別木造住宅数で重みづけすることで平均値を推計した。

$$V_s = H_w \times S_t \times V_a \quad (10)$$

V_s : 木材ストック量 [m³]

H_w : 木造住宅数 [戸]

S_t : 住宅一棟あたり延べ床面積(120.6) [m²/戸]

V_a : 延べ床面積あたり木材使用量(0.179) [m³/m²]

まず、「平成 20 年住宅・土地統計調査」¹⁹⁾の高知県における建て方、構造、階数、建築の時期別住宅数から引用した木造住宅数^{注 4)}より、(10)式を用いて現状(2012 年)の木材ストック量を推計した。そして、「人口減少、少子・高齢社会の展望」²²⁾より引用した世帯数の推移と推計の値を用いて、世帯数の減少と同じ割合で木造住宅数も減少すると仮定し、2100 年までの木材ストック量を推計した(図 10)。また、「人口減少、少子・高齢社会の展望」²²⁾では 2030 年までの推計のみであったことから、2025 年から 2030 年までの減少割合が 2100 年まで続くとして仮定した。

次に n 年木材投入量は、(11)式に基づき推計した。ケース①とケース②では、各年の木材投入量を同じとし、2012 年以降に投入される木材の利用期間をケース①では 30 年、ケース②では 50 年として、木材ストック量の将来推計を実施した。図 10 より、2100 年まで木材ストック量は減少していくことがわかった。またケース②の木材ストック量がケース①と比較して多くなるのは、木材利用期間延長により木材の残存量が多くなるためである。

$$I_n = V_{sn} - \sum_i R_{ni} \quad (11)$$

I_n : n 年における木材投入量 [m³/年]

V_{sn} : n 年における木材ストックの将来推計値 [m³]

R_{ni} : i 年に投入された木材の n 年における残存量 [m³]

図 11 伐採面積の推計フロー

図 13 新植した樹木の生長に伴う CO₂ 吸収量の将来推計結果

図 15 木材生産における CO₂ 排出量の将来推計結果

4. 2 樹木の生長に伴う CO₂ 吸収量の将来推計

図 11 に年間あたり森林伐採面積の推計フローを示す。高知県における樹種別素材生産量⁶⁾の最新データ(2009 年)に基づき木材投入量を樹種別に按分し、現地調査によって得られた F 森林組合の歩留まり(58%)を用いて年間素材生産量を推計した(図 12)。図 12 より、図 10 に示す木材ストック量の減少に伴い、素材生産量も減少することが示された。また、「平成 20 年住宅・土地統計調査」¹⁹⁾の高知県における建て方、構造、階数、建築の時期別住宅数において、2004 年以前のデータは一定期間内(例: 2001~2003 年)に建てられた住宅数データしか得られなかったため、平均の値を用いた。このため、2030 年付近の推計値が不連続となっている。

次に、この年間素材生産量を標準伐期における 1ha あたり材積で割ることにより、森林伐採面積を算出した。そしてケース①、②では皆伐植林型の森林経営手法を想定して、伐採後の森林面積に新たに植栽するとし、植栽した樹木が生長に伴い吸収する CO₂ の量を推計した。また、ケース③では標準伐期で伐採せずに、そのまま生長すると仮定して CO₂ 吸収量を推計した(図 13)。図 13 より、ケース①、②の推移が同じなのは、毎年の木材投入量が同じであることに起因する。またケース③の無伐採ケースと比較すると、ケース①、②の木材利用による継続的な森林経営を実施した方が CO₂ の吸収量が多くなることが示された。

4. 3 木材の廃棄・焼却による CO₂ 排出量の将来推計

木材生産によって発生する端材やチップ等は(7)、(8)式より材積を推計し、(2)式より CO₂ 排出量を推計した。そして、建築用木材として利用される分の廃棄・焼却による CO₂ 排出量に関しては、(3)、(4)式に従って毎年の CO₂ 排出量を推計した(図 14)。図 14 より、CO₂ 排出量はケース①よりケース②の方が少ないことが示された。これはケース②において木材利用期間が長く、廃棄・焼却されるタイミングが遅れることに起因し、木材の利用期間を延長することで 2100 年までの CO₂ 排出削減効果が見込めることが示された。

図 12 高知県における年間素材生産量の将来推計結果

図 14 木材の廃棄・焼却による CO₂ 排出量の将来推計結果

図 16 建築用木材のライフサイクルを通じた CO₂ 収支将来推計結果

4. 4 木材生産におけるCO₂排出量の将来推計

毎年の年間素材生産量及び年間木材投入量に、各段階のCO₂原単位を乗じることで木材生産におけるCO₂排出量を推計した(図15)。ここで、生産フローは図5と同様とし、乾燥工程では高知県の用途別製材品出荷量⁶⁾の最新データ(2009年)に基づき製材材積を按分し、材種毎の材積を推計した。そしてその材種別材積に各CO₂原単位を乗じることでCO₂排出量を推計した。また、F森林組合ではヒノキ板材を取り扱っておらず、CO₂原単位のデータが得られなかったため、スギ板材と同じCO₂原単位であると仮定して推計した。図15より、図12に示す年間素材生産量の減少に伴い、木材生産におけるCO₂排出量も減少することが示された。

4. 5 ライフサイクルを通じたCO₂収支の将来推計

図13、14、15より推計した建築用木材のライフサイクルを通じたCO₂収支の2100年までの将来推計結果を図16に示す。ケース①、②において2012年以降しばらくCO₂収支がマイナス(排出)なのは、図13に示すように新植した樹木のCO₂吸収量が少なく、木材の廃棄・焼却によるCO₂排出量、木材生産におけるCO₂排出量が吸収量を上回っていることに起因する。そして、ケース③の無伐採ケースより、ケース①、②の継続的な森林経営による木材利用を実施したケースの方が、将来のCO₂収支は向上することが示された。またケース①、②を比較すると、木材利用期間を延長させたケース②の方が、CO₂収支が向上することが示された。以上より、森林側では継続的な森林管理のもとで伐採搬出を促進し、消費者側では木材需要を増加させると共にその利用期間を延長させることでCO₂削減効果が得られることを示した。今後、人口減少と共に木材の需要も落ち込むと考えられるが、建築分野では住宅だけでなく広く木材利用を促進すると共に、再利用等を含めて木材をカスケード利用していくことで長く利用していくことが重要であると考えられる。

5. まとめ

現地調査、文献調査に基づき、建築用木材のライフサイクルを通じたCO₂収支をモデル化し、森林成長サイクルを考慮した各樹種の木材利用期間を検討すると共に、適切な樹木の伐採搬出によるCO₂収支の長期予測を実施した。その結果を要約して以下に示す。

- 1) 温暖地である高知県のスギ、ヒノキは、生産段階におけるCO₂排出量を抑えても、約50年以上木材として利用しなければ、CO₂収支がポジティブ(吸収)にならないことがわかった。
- 2) 高知県内で伐採され、利用される建築用木材を対象としてCO₂収支の長期予測を実施した結果、建築用木材の利用期間を延長することで、CO₂排出抑制効果が見込めることが示された。
- 3) 図16に示すように、全く樹木を伐採搬出しないケースに比べて、適切な森林管理のもとで伐採搬出し、木材利用を促進することで、将来のCO₂収支が向上することを示した。

以上のことから、本研究で構築したCO₂収支推計モデルを用い、各地域のデータを収集し、入力することで、各地域における各樹種の森林成長サイクルを考慮した木材利用期間を検討することが可能となった。また、本研究では樹木を標準伐期で皆伐すると仮定したが、実際には間伐による搬出や長伐期計画による森林施業など、木材の利用用途等によって伐期は様々であることから、本研究で示した結果はある限定的な条件によるものであることに留意されたい。

謝辞

小原忠様、笹岡高志様、塩田正興様をはじめ、現地調査に協力して下さった高知県の皆様と、研究を進めるにあたりご助言頂いた南部佑輔様(当時、慶應義塾大学大学院生)に心より謝意を表する。

注釈

- 注1) 成長曲線の一つで、柔軟な曲線形を表現できる⁸⁾
注2) ひき角類：厚さおよび幅が7.5cm以上のものを指す
ひき割類：厚さが7.5cm未満で幅が厚さの4倍未満のものを指す
板類：厚さが7.5cm未満で幅が厚さの4倍以上のものを指す
注3) 木質バイオマス成長過程のCO₂吸収量と、燃料として使用したときの排出量が相殺されるということ
注4) 本研究では木造、防火木造住宅の総数を木造住宅としている

参考文献

- 1) 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.34，2006.10
- 2) 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.207-220，2008.7
- 3) 恒次祐子，外崎真理雄：(独)森林総合研究所平成21年度成果選集，pp.12-13，2009
- 4) 藍原由紀子，浅野良晴：長野県の各流域における資源循環を前提とした建築用木材生産及び長野県全体への予測手法の拡張，日本建築学会環境系論文集 第74巻 第636号，pp.177-183，2009.2
- 5) 林野庁企画課：平成22年木材需給表，2011.12
- 6) 高知県林業振興・環境部：平成22年度高知県の森林・林業・木材産業，2011
- 7) 温室効果ガスインベントリオフィス：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，pp.7-8，2011
- 8) (独)森林総合研究所：森林大百科事典，pp.545，2009
- 9) 温室効果ガスインベントリオフィス：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，pp.7-12，2011
- 10) IPCC：Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4Agriculture，pp.12.11，2006
- 11) 一般社団法人 日本サステナブル建築協会：建築環境総合性能評価システム CASBEE 戸建-新築 評価マニュアル(2010年版)，財団法人 建築環境・省エネルギー機構，pp.192，2010
- 12) (独)日本建築学会：建築のLCA指針，丸善，2006
- 13) 大城賢，伊香賀俊治，本藤祐樹：輸入木材のLCAデータベースの構築，日本建築学会技術報告集，第16巻 第33号，pp.609-614，2010.6
- 14) 環境省：平成20年度電気事業者別実排出係数・調整後排出係数等の公表について(お知らせ)，(オンライン) 入手先<<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11956>>，参照(2012-1-8)
- 15) 経済産業省：貨物輸送事業者に行わせる貨物の輸送に係るエネルギーの使用量の算定の方法の一部を改正する告示案，(オンライン)，入手先<<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/080801/yusoushinkyu.pdf>>，参照(2012-3-29)
- 16) 森林総合研究所：木材工業ハンドブック，pp.11,14，2004
- 17) (独)森林総合研究所：森林大百科事典，pp.337，2009
- 18) ウッドマイルズ研究会：伐採木材の利用に係る炭素収支モデルの開発，2008
- 19) 総務省：平成20年住宅・土地統計調査，2009
- 20) (独)全国木材組合連合会：木造住宅関連についての質問と回答，(オンライン)，入手先<http://www.zenmoku.jp/moku_pr/QandA/ask2-11.html>参照(2012-10-4)
- 21) 高知県土木部住宅課：高知県の住宅着工状況，(オンライン)，入手先<<http://www.pref.kochi.lg.jp/uploaded/attachment/72573.pdf>>参照(2012-10-1)
- 22) 高知県政策推進課：人口減少、少子・高齢社会の展望，2005

[2012年6月20日原稿受理 2012年9月28日採用決定]