

# マテリアルフロー分析に基づいた 建築分野における木材の炭素収支について

天野耕二<sup>1</sup>・加用千裕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 立命館大学教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577草津市野路東1-1-1)

<sup>2</sup>立命館大学大学院理工学研究科

日本の建築分野における木材フローに基づいて、建築木材に関わる炭素収支評価を試みた。2000年に着工された日本国内の建築物に木材としてストックされた炭素量は379万t-C、これら建築木材に関わる森林放置木材や廃棄木材としての炭素放出量は429万t-C、建築木材の生産および輸送過程における化石燃料起源の炭素放出量は297万t-Cと推定された。伐採後の植林による炭素吸収量は、建築物の平均耐用年数である30年を育林期間と仮定すると447万t-Cと推定され、建築物の解体時に放出される炭素量を上回った。

*Key Words: wood material flow analysis, carbon mass balance, building, service life*

## 1. はじめに

森林は、地球温暖化の主な原因物質とされる二酸化炭素を吸収固定するため、温暖化抑制の機能を持っていると考えられており、森林の存在の重要性が改めて認識されている。また、森林から生産される木材は、鉱物資源や化石資源のような枯渇性資源とは異なり、適正な森林管理によって再生産が可能な更新性資源であることから、循環可能な資源として高く評価されるものである。日本の木材自給率が減少傾向にある一方で、国内の森林における木材蓄積量は年々増加している上に、木材として伐採可能と考えられる林齢に達している人工林の面積が約2割まで伸びており<sup>1)</sup>、日本の森林は利用の段階を迎えているといえる。

国連気候変動枠組み条約において1997年に日本で採択された「京都議定書」では、森林における二酸化炭素の吸収を評価することとなった。しかし炭素吸収源として森林を評価する際に、伐採がどのように扱われるかについては大きな課題となっている。京都議定書では森林の伐採は二酸化炭素の放出と評価されているが、建築木材や木製品には伐採後も炭素が蓄積されており、それらが廃棄されない限り大

気中に二酸化炭素を放出することにはならないことから、その評価については第2約束期間以降とされている。これを受けて、国内において木材の炭素蓄積量を詳細に把握する研究<sup>2,3)</sup>が進められている。

木材は、建築用材、木製家具、紙等に利用されているが、特に建築物は資源を長期的にストックするという側面をもっていることから、建築木材には長期的な炭素蓄積機能があると評価することができる。そこで、本研究は、国内の建築分野を対象とした木材のマテリアルフロー分析に基づいて、建築木材に関わる炭素収支評価を長期的な時間スケールで検討する。マテリアルフロー分析とは、人間の経済活動が自然環境からどれだけの資源を取り出し、自然環境にどれだけの廃物を排出するか、また、人間活動の内部で、物質がどのように流通し、変化していくかを体系的・定量的に把握する手法<sup>4)</sup>である。木材を対象としたマテリアルフロー分析<sup>5,6)</sup>に加えて、木材に関わる炭素フローや炭素収支評価についての研究<sup>7,8)</sup>も報告されている。

本研究は、建築木材に関わる炭素収支評価を行う際、森林から伐採され建築分野に投入される木材のうち、建築物にストックされるものを「炭素蓄積量」、森林放置もしくは廃棄木材として焼却処分さ



b) 間伐残材発生量および未利用間伐材積

先に述べた残材発生量の捉え方に従って、間伐材積から立木材積を推計し、残材発生率を乗じて間伐残材発生量とした。間伐材積は「間伐実施状況調査<sup>19)</sup>」を用いて、2000年の間伐材積に国内素材生産量における製材用・合板用素材生産量割合を乗じて、製材用・合板用素材生産量に対応する間伐材積を求めた。また、未利用間伐材積は「間伐実施状況調査」から間伐材積の60%とした。なお輸入材についても国内の状況と同等と仮定した。

間伐材立木材積 = 間伐材積 / 0.8

間伐残材発生量 = 間伐材立木材積 × 15%

c) 木材輸送用道路建設のための木材伐採量

2000年新設林道距離(林野庁業務資料<sup>20)</sup>)に平均幅員5mを乗じて林道面積における森林伐採量を推計した。なお森林蓄積量は「森林資源調査結果<sup>21)</sup>」の国内民有林の単位面積あたり蓄積量を引用した。このように推計した森林伐採量に素材生産量における製材用・合板用素材生産量割合を乗じて、製材用・合板用素材生産量に対応する林道用伐採量を求めた。なお輸入材についても国内の状況と同等と仮定した。

d) 工場残材発生量

製材・合板生産時に発生する木くず等の工場残材は、工場への素材入荷量(合板工場への単板入荷量を含む)から製材・合板生産量を差し引いて求めた。木くず発生量の93%は、木質ボード、製紙用チップ、燃料、肥料等に再利用<sup>22)</sup>され、7%が焼却処分されるため残材発生量の7%を廃棄木材量とした。輸入製材・合板についても国内の状況と同等とした。

e) 建築工事廃材発生量

(1) c)の建築分野木材投入量の10%を建築現場における木くず発生量とした。またコンクリート型枠合板、枠材等の工事用木材も建築廃材として「調査報告書」における「損料対象木材」の統計値を引用した。

(3) 木材の生産や輸送に伴って消費された化石燃料起源の炭素放出量

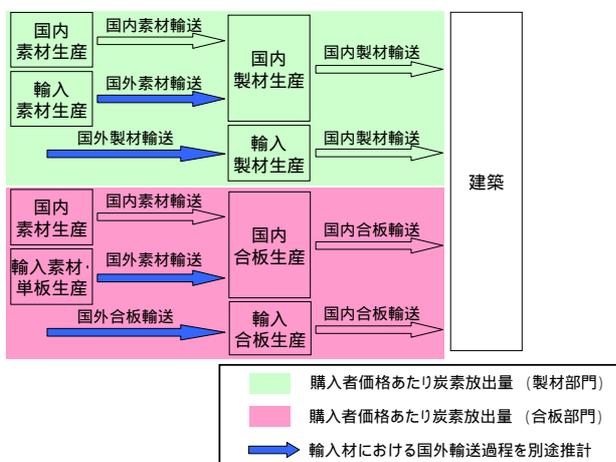


図-2 分析対象範囲および炭素放出量推計方法

化石燃料起源の炭素放出量を推計する際の分析対象範囲を図-2に示す。素材生産過程、製材・合板生産過程およびこれらの国内輸送過程は、1995年産業連関表から推計された購入者価格あたりの原単位<sup>23)</sup>を用いて炭素放出量を算出した。

素材生産過程から製材生産を経て製材輸送過程に至るまでの炭素放出量原単位には「製材部門」原単位(固定資本形成を含まない国内[1-Ad]<sup>-1</sup>型逆行列)を、素材生産過程から合板生産、合板輸送過程に至るまでの炭素放出量原単位には「合板部門」原単位(固定資本形成を含まない国内[1-Ad]<sup>-1</sup>型逆行列)を引用した。なお輸入材(素材、単板、製材、合板)生産過程については国内生産過程と同等と仮定し、上記の原単位を用いた。

また輸入材輸送過程については産業連関表から把握することが困難なため、輸入材の国内到着地点を東京と仮定して、各輸入産地からの輸送距離<sup>24)</sup>に輸送手段別エネルギー原単位<sup>25)</sup>を乗じて炭素放出量原単位を求めた。

### 3. 建築分野における木材(製材・合板関連)マテリアルフロー推計結果

2000年の1年間における木材(製材・合板関連)マテリアルフローの試算結果を図-3に示す。国内製材生産量および6材種の製材輸入量(2.(1)b))の合計は2656万m<sup>3</sup>であり、このうち58%に相当する1541万m<sup>3</sup>が建築分野への製材投入量(2.(1)c))と推定された。また、国内合板生産量および6材種の合板輸入量(2.(1)b))の合計は929万m<sup>3</sup>であり、36%の336万m<sup>3</sup>が建築分野合板投入量(2.(1)c))と推計された。

建築分野への木材投入量を推定する際の統計データとしては、「木材需給報告書」に国内製材生産量とその用途別出荷量の統計値があり、建築用材出荷量を把握することができる。しかし、この統計データからは輸入製材における建築用材出荷量を把握す

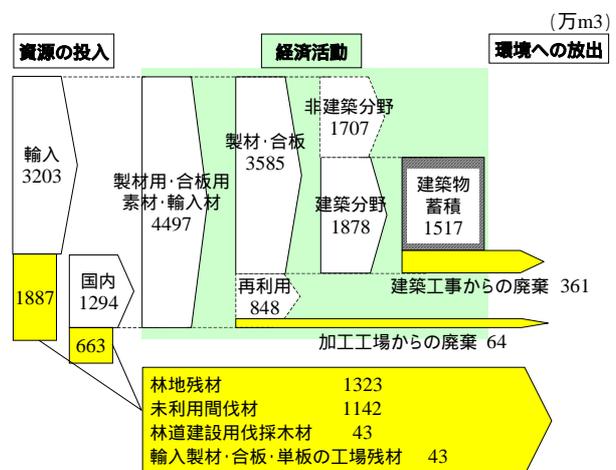


図-3 2000年に日本で消費された木材(製材・合板関連)のフロー

することはできない。「平成13年木材流通構造調査<sup>15)</sup>」(2001年実績の調査で2000年は行われていない)によると、国内製材生産量の68%に相当する製材が建築業に出荷されているのに対して、輸入製材においては輸入量の30%相当が建築業に出荷されている。国内製材と輸入製材の建築分野出荷割合には大きな差があり、輸入製材の建築分野出荷量の扱いが建築分野への製材投入量の推計に影響を与えと考えられる。さらに、「木材需給報告書」の建築用材出荷量にはプレカット工場、プレハブ工場、集成材工場等に出荷される製材が含まれていると考えられる。これらの加工過程における歩留まりを考慮すると、建築現場への投入量は建築用材出荷量と比較して少なくなると推定される。特にプレカットについては、在来工法木造住宅の機械プレカット率が6割まで上がってきており、構造材を機械プレカットしている在来工法やプレハブ工法とほぼ現場加工の2×4工法では、建築現場で発生する廃棄木材量に10%近く差が出るという報告<sup>16)</sup>もある。

以上のことから、「木材需給報告書」の建築用材出荷量においては、輸入製材の扱いや機械プレカット等による廃棄木材の把握について検討する必要があると考えられる。本研究では、先に述べたように建築構造別の単位面積あたり木材使用量調査から推定された「調査報告書」の統計値を用いて建築分野木材投入量を推計することにより、製材・合板合計では国内生産量および輸入量の合計3585万m<sup>3</sup>の52%に相当する1878万m<sup>3</sup>を建築分野投入量とした。また、これをもとに工場残材の再利用量および最終廃棄量の52%を建築分野に関わる廃棄木材フローと仮定して、この廃棄木材量を建築分野投入量に加えて、建築分野への素材投入量とした。これを国産材、輸入材にそれぞれ配分し、建築分野における2000年1年間の木材フローを推計した(図-4)。

建築分野に関わる直接木材投入量は2352万m<sup>3</sup>と推定され、国産材が3割、輸入材は7割である。林地残材、未利用間伐材等の森林に放置される廃棄木材量

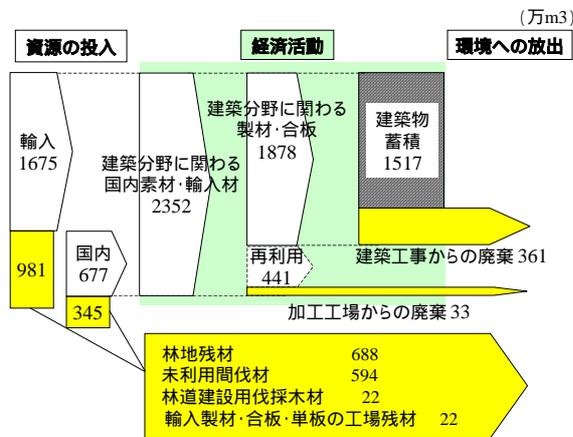


図-4 2000年の日本の建築分野における木材(製材・合板関連)フロー

は国内外合わせて1304万m<sup>3</sup>であり、これらに国外の工場残材も含めた実質木材伐採量は3678万m<sup>3</sup>と推定された。建築木材に関わる廃棄木材発生量において、林地残材および未利用間伐材の発生量が非常に大きく、加工工場における残材最終処分量(輸入製材・合板・単板工場分も含む)は比較的小さい値となっている(図-5)。これは工場残材発生量の93%が木質ボード、製紙用チップ、燃料、肥料等に有効利用されているためである。また、木材輸送用道路(林道)建設のための木材伐採量は、さらに小さい値と推計された。林道新設量は年々減少傾向にあるため<sup>20)</sup>、今後、林道建設用の木材伐採量は減少すると考えられる。

また、2(1)c),d)による推計の結果から、最終的に建築木材として建築物に蓄積される1517万m<sup>3</sup>を建築構造別にみると、木造建築に83%、非木造建築に17%が使用されている(表-1)。

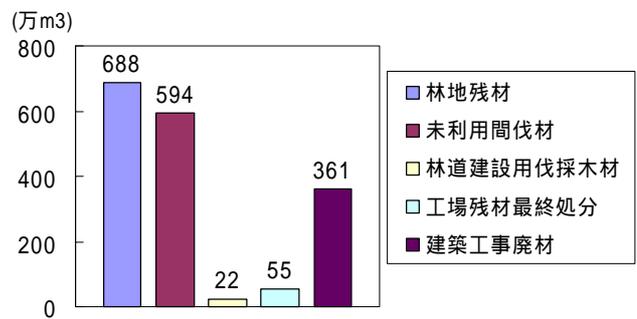


図-5 建築木材に関わる廃棄木材発生量

表-1 建築構造別の木材蓄積量

建築構造	蓄積率 (%)	蓄積量 (万m <sup>3</sup> )
木造	83	1260
鉄骨鉄筋コンクリート造	2	31
鉄筋コンクリート造	6	95
鉄骨造	8	128
コンクリートブロック造とその他	1	2
建築合計	100	1517

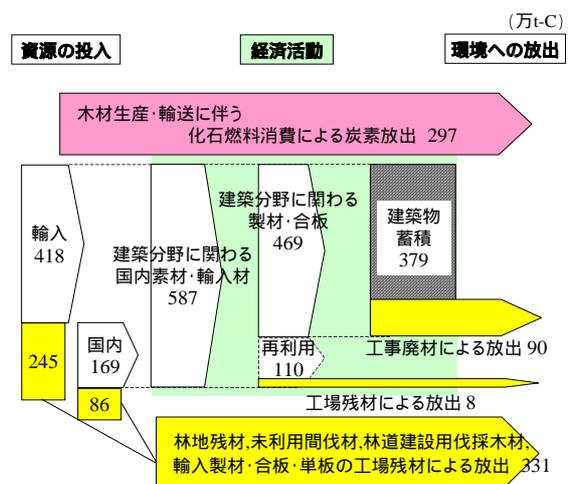


図-6 日本の建築木材に関連する炭素フロー

#### 4. 建築木材フローにおける炭素収支評価

図-4に示した建築木材フローを木材中に固定されている炭素のフローとして評価してみる。木材の炭素含有率50%および比重0.5<sup>26)</sup>を用いて炭素量換算し、建築木材の生産および輸送過程で消費される化石燃料起源の炭素放出量推計結果も含めた2000年1年間の炭素フローを図-6に示す。建築物には炭素量として379万t-Cが蓄積されていることになる。一方で、建築工事および加工工場から発生する廃棄木材が焼却処分される際の炭素放出量、林地残材および未利用間伐材等の森林に放置される木材が腐敗する際の炭素放出量を合わせると429万t-Cと推定された。また、木材生産・輸送に伴う化石燃料消費による炭素放出量は297万t-Cであり、総炭素放出量は726万t-Cと推計された。

廃棄木材による炭素放出量のうち、森林に放置されて腐敗すると考えられるものが76%を占める(図-7)。林野庁が行っている「間伐実施状況調査」によると、2000年に国内で間伐された木材のうち木材製品として有効利用(製材、丸太、原材料)されたのは4割であり、残り6割は未利用のまま放置されている状況である。さらに、小径木や枝条などの林地残材についても無視できない量が森林内に放置されているため、これら未利用間伐材および林地残材の有効利用を進めることが重要である。

つぎに、建築木材の生産および輸送に伴って消費される化石燃料起源の炭素放出量についての推計結果を図-8に示す。製材用素材および製材の生産過程と建築現場までの国内輸送過程における炭素放出量は、41万t-Cと推定された。合板用素材および合板の生産過程と建築現場までの国内輸送過程における炭素放出量は、135万t-Cである。さらに、海外から輸入された素材、製材、単板、合板の国内到着地点を全て東京と仮定した場合、各輸入産地からの輸送過程における炭素放出量合計は121万t-Cとなった。これは、建築木材の生産および輸送過程で消費される化石燃料による炭素放出量の41%に相当する。仮に輸入材を全て国産材に代替した場合、この121万t-Cに近い炭素放出量が削減可能と考えられる。

#### 5. 建築物の耐用年数と植林による炭素吸収量

森林で二酸化炭素を吸収固定した木材は、森林から建築物へ炭素固定場所を移動し長期蓄積される。しかし、建築物は最終的に解体廃棄されるため、建築木材に長期蓄積されている炭素量も潜在的な炭素放出量として評価する必要がある。建築物の寿命すなわち耐用年数が炭素蓄積期間であり、同時に伐採跡地への植林による炭素吸収期間にも相当すると考えることができる。そこで、耐用年数を植林による育林期間と仮定して炭素吸収量を推定し、建築物の

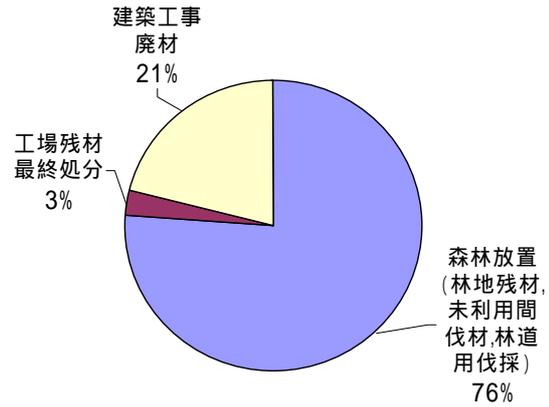


図-7 廃棄木材による炭素放出量構成比率

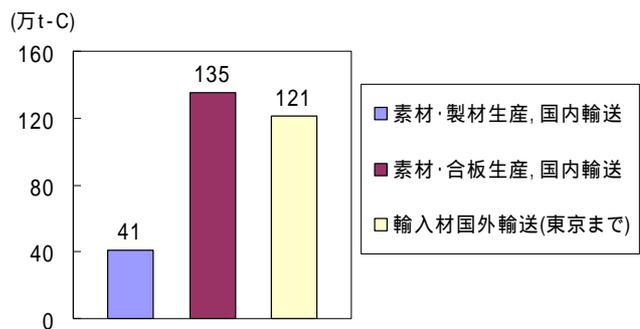


図-8 建築木材の生産および輸送過程で消費される化石燃料起源の炭素放出量

長寿命化による炭素放出量削減効果を考察する。

伐採後に植林する面積については、2000年に建築分野に投入された総木材量3678万m<sup>3</sup>(建築物蓄積量および廃棄木材量の合計)を木材が伐採された各陸域生態系における平均的なバイオマス蓄積量(枝条等を含む)<sup>27)</sup>で除することにより算出した。このような算出結果である10万5千haを伐採後に植林可能な最大面積と仮定して、建築分野への木材資源投入後の新たな炭素吸収量を評価する基本面積とした。

世界の各種森林での長期タワー観測から求めた森林生態系の炭素吸収速度として1.0~5.8t-C/ha/yearという値が報告されているが<sup>28)</sup>、季節変動や地域特性によるばらつきを説明するには観測データが未だ不足している。ここでは、エコロジカルフットプリント指標<sup>29)</sup>における二酸化炭素吸収面積の算定において一般的に用いられている1.42t-C/ha/yearという世界の平均的な森林の炭素吸収速度<sup>30-32)</sup>を用いて育林期間中の炭素吸収を評価した。その結果、育林期間25年で建築物の炭素蓄積量にほぼ相当する373万t-Cを伐採後植林された森林が吸収することがわかった(表-2)。

建築物の現状の平均耐用年数は、木造で37年、非木造で21年といわれており<sup>33)</sup>、平均耐用年数を30年と仮定した場合、建築物解体までの森林の炭素吸収量は育林期間を30年とることにより447万t-Cとなる。

表-2 育林期間別の森林炭素吸収量

	育林期間25年 (万t-C)	育林期間30年 (万t-C)	育林期間54年 (万t-C)	育林期間74年 (万t-C)
北洋材生産地	48	57	103	142
南洋材生産地	64	76	138	189
北米材生産地	98	117	211	289
ニュージーランド材生産地	21	26	46	63
チリ材生産地	6	8	14	19
欧州材生産地	22	27	49	67
国内素材生産地	113	136	245	336
生産地合計	373	447	805	1103

すなわち、現状の平均耐用年数を維持している限り将来解体廃棄された際の炭素放出量は、伐採後植林された森林の炭素吸収量によって相殺されると考えられる。また、育林期間を54年まで延長した場合、森林の炭素吸収量は805万t-Cと推計され、廃棄木材による炭素放出量を考慮しても、森林の炭素吸収で建築木材に関わる炭素放出を相殺することが可能となる。さらに、育林期間を74年に延長すると、森林の炭素吸収量は1103万t-Cと推計され、建築木材の生産と輸送に伴う化石燃料消費による炭素放出量も含む総炭素放出量1105万t-Cを相殺可能となる。しかし、老齢期になると吸収量が減少していく森林の炭素吸収能力の限界を考慮すると、育林期間の延長だけでなく、適切な伐採周期を維持するための新規木材需要の拡大を想定する必要もある。

## 6. まとめ

本研究では、2000年の建築分野における木材のマテリアルフローの把握に基づいて、建築木材に関わる総合的な炭素収支評価を行った。建築木材としての炭素蓄積量は379万t-Cであり、83%が木造建築物に蓄積されたものと考えられる。建築木材に関わる廃棄木材による炭素放出量は429万t-Cであり、そのうち76%が未利用間伐材、林地残材等の森林放置によるものである。また、建築木材の生産および輸送過程で消費される化石燃料による炭素放出量は297万t-Cと推計され、41%が輸入材輸送過程における放出であったことから、輸入材を国産材に代替した場合、約121万t-Cの炭素放出量削減が期待できることがわかった。さらに、建築物の平均耐用年数である30年を伐採後の植林による育林期間と仮定すると、将来解体廃棄された際の建築木材そのものによる炭素放出量は、この育林期間中の炭素吸収量で相殺され炭素放出にはならないことが確認できた。廃棄木材による炭素放出量も含めて建築木材に関わる炭素放出を相殺するために必要な育林期間は54年、化石燃料消費も含む建築木材フローに関連する総炭素放出量を森林の炭素吸収量で相殺するための仮想的な育林期間は74年と推定された。

今後の課題としては、製材・合板以外の木材（集成材、削片板、繊維板等）の建築分野投入量も考慮

すること、加工工場で発生する廃棄木材および建築物解体廃材の再利用過程も含めた炭素収支評価を行うこと、輸入材に関するデータについて各産地の状況を反映した正確な情報を調査することなどが挙げられる。さらに、更新性資源である木材を他の非更新性材料に代替することは、化石資源の消費抑制や二酸化炭素放出削減に効果的であるばかりでなく、森林の適切な伐採周期を維持して炭素吸収量を確保するためにも必要であると考えられるため、他材料への代替効果を評価していくことも重要であろう。

謝辞：本研究の一部は平成15年度文部省科学研究費補助金（基盤研究(C)）の交付を受けておこなわれたことを記し、謝意を表します。また、基本統計データの収集に際して詳細なヒアリング調査および資料閲覧に際して資料閲覧にご協力頂いた関連各種協会団体の方々に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 林野庁：平成14年度 森林・林業白書、農林統計協会、pp.43、2002。
- 2) 橋本征二、森口祐一：日本における木製品の炭素収支リサイクル、長寿命化、貿易のインプリケーション、環境経済・政策学会 2002大会 報告要旨集、pp.228-229、2002。
- 3) 相馬智明、有馬孝礼：建築用木材の出荷量による炭素貯蔵量の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.1107-1108、2003。
- 4) 森口祐一：マテリアルフロー分析からみた人間活動と環境負荷、環境システム研究、Vol.25、pp.557-568、1997。
- 5) 橋本征二、森口祐一、齋藤聡、小野隆史：マテリアルフローの把握にもとづく木材資源の循環度の分析、第30回環境システム研究論文発表会講演集、pp.235-240、
- 6) 渋谷健司、高倉智志、吉田倬郎：建築の主要材料のマテリアルフローに関する研究、工学院大学研究報告第94号、pp.175-185、2003。
- 7) 三浦秀一：日本における建築の木材フローとバイオマスエネルギーから見る地球温暖化対策 建築と地域のバイオマスビジョン(1)、日本建築学会大会学術講演梗

- 概集（東海）， pp.949-950, 2003.
- 8) 有馬孝禮：木材のライフサイクルCO<sub>2</sub>(LCCO<sub>2</sub>)の評価，  
森林文化研究， pp.147-157, 1998.
  - 9) 林野庁：平成14年度 森林・林業白書， 農林統計協会，  
pp.204, 2002.
  - 10) 林野庁：平成14年度 森林・林業白書， 農林統計協会，  
2002.
  - 11) 林野庁：平成14年度 森林・林業白書， 農林統計協会，  
pp.208, 2002.
  - 12) 林野庁：林業統計要覧， 農林統計協会， 2002.
  - 13) 国土交通省総合政策局：建設資材・労働力需要実態調  
査（建築部門）報告書 2000年度実績， 2002.
  - 14) 建設省計局：建築統計年報， 建設広報協議会， 2000.
  - 15) 農林水産省：平成13年木材流通構造調査， 2002.
  - 16) 秋山俊夫：木材のリサイクル， pp.78-79, 産調出版  
株式会社， 1998.
  - 17) 林野庁計画課：間伐実施状況調査， 2001.
  - 18) クリーンジャパンセンター：再資源化技術の開発状況  
調査報告書， 1995.
  - 19) 林野庁計画課：間伐実施状況調査， 2001.
  - 20) 林野庁：平成14年度 森林・林業白書， 農林統計協会，  
pp.192, 2002.
  - 21) 林野庁：林野庁業務資料 森林資源の現況，  
<http://www.rinya.maff.go.jp/toukei/15toukei/shigen.htm>
  - 22) 日本木材総合情報センター：木質系残廃材を原料とす  
るチップ製造業 住宅解体業・中間処理業工場におけ  
る建築解体木材の発生量と利用・処理方法の動向，  
2000.
  - 23) 日本建築学会：建物のLCA指針 環境適合設計・環境  
ラベリング・環境会計への応用に向けて， 丸善，  
2003.
  - 24) 藤原敬：循環社会と輸入木材の輸送過程消費エネルギ  
ー， 木材工業， Vol.55, No.6, 2000.
  - 25) 省エネルギーセンター：エネルギー・経済統計要覧，  
日本エネルギー経済研究所， 2000.
  - 26) 木材工業ハンドブック編集委員会：木材工業ハンドブ  
ック改訂3版， 丸善， 1982.
  - 27) 大谷義一：二酸化炭素フラックス， 森林科学 33，  
pp.10-17, 2001.  
<http://cse.ffpri.affrc.go.jp/ohtan03/global/fnetetc1/fs02.htm>
  - 28) 山本晋：植生と日本/アジアのCO<sub>2</sub>フラックス測定ネ  
ット - 森林生態系の吸収能の解明を目指して - ，  
NIREニュース，資源環境技術総合研究所， 1998 ，  
<http://www.nire.go.jp/publica/news-98/98-10-2.htm>
  - 29) 和田喜彦：問題認識・解決ツールとしての「エコロジ  
カルフットプリント」指標 「オーバーシュート」  
を感知する新パースペクティブ，水資源・環境研究，  
Vol. 14 ， pp.36-44 ， 2001.
  - 30) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) :  
Greenhouse Gas Inventory: Workbook , *IPCC Guidelines* ,  
Vol.2 , IPCC, OECD and IEA , 1997.
  - 31) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) :  
Greenhouse Gas Inventory: Reference Manual , *IPCC  
Guidelines* , Vol.3 , IPCC, OECD and IEA , 1997.
  - 32) Wackernagel, M. : Calculation of Forest Timber  
Productivity and Forest Carbon Absorption , Centro de  
Estudios para la Sustentabilidad , Universidad Anahuac  
de Xalapa , 1998.
  - 33) 住宅金融公庫建設サービス部：Better living 102，  
pp.6-11, 1987.

## CARBON MASS BALANCE RELATED TO ARCHITECTURAL WOOD BASED ON MATERIAL FLOW ANALYSIS

Koji AMANO, Chihiro KAYO

This study analyzed the carbon mass balance related to architectural wood based on material flow analysis. We estimated that the total carbon stock increment in Japanese architectural wood in the year 2000 was nearly 3,790,000 t-C. The estimated carbon emissions from the incineration or decomposition of unutilized and waste wood were nearly 4,290,000 t-C. In addition, the estimated carbon emissions via fossil fuel consumption during the production and transport of architectural wood were nearly 2,970,000 t-C. Assuming 30 years as the average service life of buildings, the carbon assimilation in 30 years following reforestation is nearly 4,470,000 t-C, which exceeds the carbon emissions from architectural wood after the demolition of these buildings.