

**講演**

平成 29 年度 森林部門技術士会 研究例会 (林産部会)

**LCA による木材利用の再評価**

国立大学法人 東京農工大学 准教授 加用 千裕



**1. はじめに**

近年、地球温暖化緩和と木材利用との関係を見える化する手法の1つとして、ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment: LCA) が注目されています。本稿では、木材利用による地球温暖化緩和効果を概説した後、LCA の基礎および木材の土木利用への応用事例を紹介します。

**2. 木材利用による地球温暖化緩和効果**

木材利用には、3つの地球温暖化緩和効果が期待されています<sup>1)</sup>。

1つめは、炭素貯蔵効果です。これは、森林が成長過程で大気中から吸収した炭素 (CO<sub>2</sub>) を伐採後の木材も貯蔵し続けることによる効果です。建築、土木、紙等の様々な用途に利用される木材は、最終的に燃焼あるいは生物分解されるまで人間社会における炭素貯蔵庫となります。その間に森林において次世代更新による新たな炭素吸収・貯蔵を進めることができます。このように、森林と木材の双方で炭素貯蔵量を増やすことによって、大気中の CO<sub>2</sub> を減らすことに貢献します。

2つめは、材料代替効果です。木材と比べて、金属、コンクリート、プラスチック等は、材料の生産・加工といったライフサイクルにおけるエネルギー消費量が大きいため、これらを木材へ代替することで化石燃料消費に伴う CO<sub>2</sub> 等の温室効果ガス (GHG) 排出量を削減することができます。

3つめは、燃料代替効果です。未利用の林地残材、間伐材、製材残材、使用済みの廃棄木材等をエネルギー源として利用し、化石燃料と代替することで GHG 排出量を減らすことに貢献します。エネルギー利用形態としては、熱、電力、液体燃料等の様々なものがあり、技術開発や普及が進められています。

**3. Life Cycle Assessment (LCA)**

LCA とは、対象となる製品やサービスのライフサイクル全体 (資源の採取から製品の使用・廃棄まで) を考慮しながら、資源消費量や環境負荷排出量を計量し、その環境への影響を総合的に評価する方法です<sup>2)</sup>。普段私たちが目にする製品やサービスの使用過程での環境影響だけでなく、製品が生産され廃棄に至るまでの目に見えない過程の環境影響を見える化することが LCA の特徴といえます。

LCA は、国際標準規格化されており、ISO14040 シリーズとして発行されています<sup>3)</sup>。この規格において、LCA を実施する際の一般的手順として、「目的と調査範囲の設定」、「インベントリ分析」、「影響評価」、「解釈」の4つのステップが定められています。以下に各ステップの概要を説明します。

目的と調査範囲の設定では、LCA を行う目的や対象とする製品 (あるいはサービス) を明確にし、評価する環境影響を定めます。例えば、木製遮音壁の場合、「木製遮音壁の地球温暖化への影響」を評価することを定め

ます。この目的に従って計量すべき環境負荷物質を決め、それらを収集する範囲を決めます。LCAで評価する対象は、その製品の機能であり、例えば、木製遮音壁の場合、「十分な強度を有しつつ遮音する」という機能です。この機能の大きさを示す単位を機能単位と呼びます。LCAにおいて複数の製品を比較する際には、機能単位を統一することが求められます。例えば、木製遮音壁、コンクリート製遮音壁、金属製遮音壁について、機能単位を同一にして比較を行う必要があります。また、LCAでは、ライフサイクルの対象範囲を「システム境界」として明確にすることが求められます(図1)。システム境界の例として、資源の採取から製品の廃棄までのライフサイクル全体を対象とすることを「Cradle to Grave」、資源の採取から製品の生産までを対象とし、製品の使用や廃棄は対象外とすることを「Cradle to Gate」と呼びます。

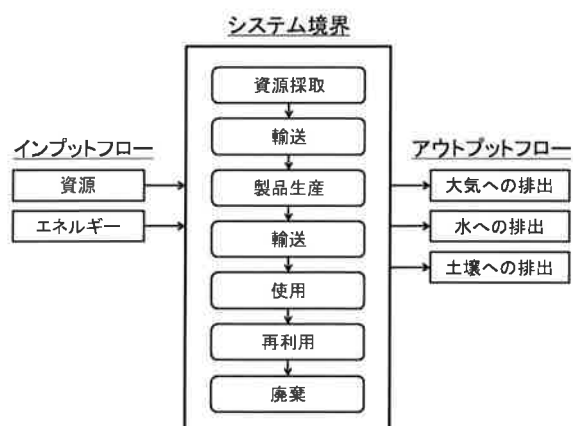


図1 LCAのシステム境界とインプット・アウトプットフローの概念図

インベントリ分析では、設定されたシステム境界全体に投入される資源やエネルギー(インプットフロー)と排出される環境負荷物質(アウトプットフロー)のデータを収集し、計量します(図1)。対象となる製品に直接的に関係する生産・使用・廃棄等のデータは、一般的に「フォアグラウンドデータ」と呼ばれます。一方、対象製品に使用される

材料や燃料の生産・使用による環境負荷物質の排出量等は、対象製品に間接的に関係するデータであり、一般的に「バックグラウンドデータ」と呼ばれます。バックグラウンドデータの収集は、大きく分けて、実際の工場の材料・燃料使用量等の物理的な数値をもとに算定する積み上げ法と、総務省が概ね5年ごとに公表する産業連関表を用いて価格当たりの環境負荷量を推算する産業連関法があります。前者の代表的なデータベースとしては、産業技術総合研究所および産業環境管理協会が作成しているIDEA<sup>4)</sup>があり、後者の代表的なデータベースとしては、国立環境研究所が作成している3EID<sup>5)</sup>が挙げられます。

影響評価では、インベントリ分析によって収集されたデータをもとに、どのような環境影響がどの程度発生するかを定量的に評価します。国際的に複数の影響評価手法が提案されていますが、日本では、産業技術総合研究所を中心に日本版被害算定型影響評価手法(LIME)<sup>6)</sup>が開発されています。LIMEによる影響評価は、運命分析、暴露分析、影響分析、被害分析、統合化の手順で行います。運命分析では、インベントリ分析で得られた環境負荷物質の排出による大気、水、土壌等の環境中の濃度変化を分析します。暴露分析では、環境中の濃度変化による人間等のレセプタへの暴露量の変化を分析します。影響分析では、暴露量の変化によるレセプタの潜在的影響量の変化を評価します。被害分析では、共通する保護対象(人間健康、社会資産、一次生産、生物多様性)ごとに被害量を集約します。最後の統合化では、保護対象間の重要度で重み付けされた環境影響の統合化指標を得ます。

解釈では、これまでに得られたインベントリ分析や影響評価の結論が客観的かつ合理的であるかを検討します。システム境界の設定範囲、インベントリ分析や影響評価で用いたデータや係数の選択等によって、異なる結果

が導かれる可能性があります。感度分析等でこれらの結果への影響を考察します。

LCAにおける環境負荷物質として、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O等のGHGだけを対象とするものは、カーボンフットプリント(CFP)と呼ばれ、データ整備や普及が進められています。また、CO<sub>2</sub>だけを対象とするものは、LCCO<sub>2</sub>とも呼ばれます。

#### 4. 土木分野における木材利用のLCA

3章で述べたLCAの考え方や方法を用いて、土木構造物への木材利用によるライフサイクルでのGHG排出量およびGHG排出削減量を検討した研究事例を紹介します。代表的な木製土木構造物として、(1)丸太杭、(2)木製治山ダム、(3)木材チップ舗装歩道、(4)木製ガードレール、(5)木製遮音壁の5つの事例を取り上げます<sup>7)</sup>。なお、本章では、2章で概説した材料代替効果および燃料代替効果を対象とし、炭素貯蔵効果は対象としていません。

##### (1) 丸太杭<sup>8)</sup>

軟弱地盤対策のための地盤改良材として丸太を地中に打設する丸太杭を対象とし、ライフサイクルでのGHG(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)排出量を評価しました。また、砂杭(サンドコンパクションパイル工法)やセメント杭(深層混合処理工法)と比較し、丸太杭のGHG排出削減効果を検討しました。地盤改良率によって機能単位を統一し、耐用年数は半永久(地中に永久固定)としました。システム境界として、原材料調達・製品生産(丸太杭では、育林と丸太生産)過程と施工過程を対象に、材料・燃料消費量からGHG排出量を計算しました。各GHGは、地球温暖化係数100年値を使ってCO<sub>2</sub>量(kg-CO<sub>2</sub>-eq)へ換算しました。

結果(図2)をみると、丸太杭と砂杭は同程度のGHG排出量でしたが、セメント杭は丸太杭の約7倍の排出量であることが分かり

ました。セメント杭を丸太杭へ代替することによって、改良面積1m<sup>2</sup>当たり402kg-CO<sub>2</sub>-eqのGHG排出削減効果が期待できます。

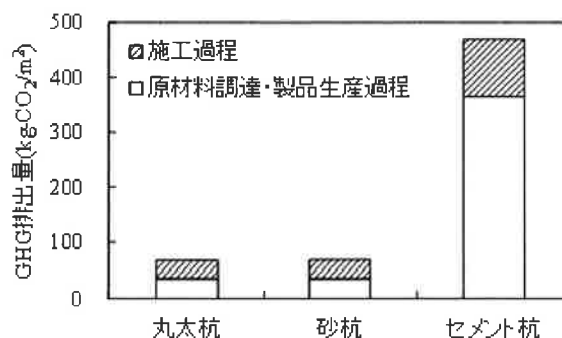


図2 地盤改良材のGHG排出量

##### (2) 木製治山ダム<sup>9)</sup>

秋田県で開発された2種類の木製治山ダム(スギ材を利用したオールウッド型、スギ材と鋼材を混合利用したハイブリッド型)(図3)を対象として、ライフサイクルでのCO<sub>2</sub>排出量を評価しました。また、コンクリート製治山ダムや鋼製治山ダムと比較することにより、木製治山ダムのCO<sub>2</sub>排出削減効果を検討しました。全ての治山ダムについて、土砂抑止量によって機能単位を統一し、耐用年数は50年としました。システム境界は、原材料調達・製品生産(木材では、育林、丸太生産、丸太輸送、製材生産)、施工、維持管理(木材の一部交換)のライフサイクル過程を対象とし、各過程における材料・燃料消費量からCO<sub>2</sub>排出量を計算しました。

評価期間50年の結果(図4)では、木製オールウッド型のCO<sub>2</sub>排出量が最も小さく、コンクリート製が最も大きくなりました。また、



オールウッド型      ハイブリッド型

図3 木製治山ダム

木製ハイブリッド型と鋼製に大きな差はありませんでした。木材を多用する治山ダムほどCO<sub>2</sub>排出量は小さくなることが分かりました。コンクリート製を木製オールウッド型へ代替することにより、治山ダム1基当たり25t-CO<sub>2</sub>のCO<sub>2</sub>排出削減効果が期待できます。

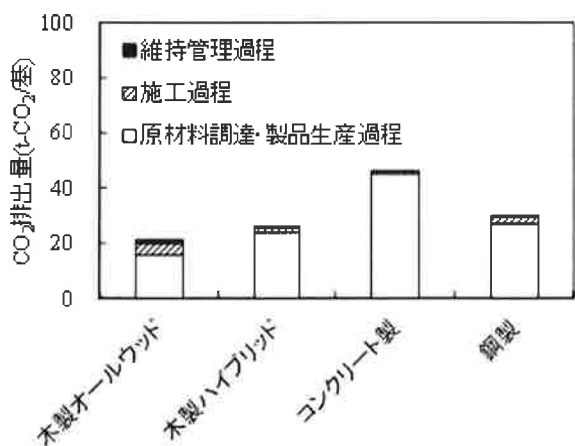


図4 治山ダムのCO<sub>2</sub>排出量

### (3) 木材チップ舗装歩道<sup>10)</sup>

岩手県において東日本大震災で発生したスギの津波塩害木を有効利用した木材チップ舗装歩道(図5)を対象に、ライフサイクルにおけるGHG排出量を評価しました。また、アスファルト舗装歩道や人工芝歩道と比較し、木材チップ舗装歩道のGHG排出削減効果を検討しました。システム境界は、原材料調達(丸太生産、丸太輸送、接着剤の原材料生産)、製品生産(木材チップ生産、接着剤生産)、製品輸送(木材チップ輸送)、施工、廃棄・再利用(廃チップの燃料利用)の各過程とし、耐用年数は10年としました。



原料の津波塩害木 木材チップ舗装歩道

図5 木材チップ舗装歩道

評価期間10年の結果(図6)では、原材料調達過程から施工過程までのGHG排出量は、木材チップ舗装歩道が最も大きくなりました。排出量のほとんどは、原材料調達過程における接着剤の原材料生産によるものです。しかし、廃棄・再利用過程における廃チップの燃料利用による重油代替によってGHG排出量が大幅に削減され、結果的にアスファルト舗装歩道や人工芝歩道よりも正味のGHG排出量(=GHG排出量-GHG排出削減量)が小さくなりました。アスファルト舗装を木材チップ舗装へ代替することにより、舗装歩道1m<sup>2</sup>当たり15kg-CO<sub>2</sub>-eqのGHG排出削減効果が得られます。

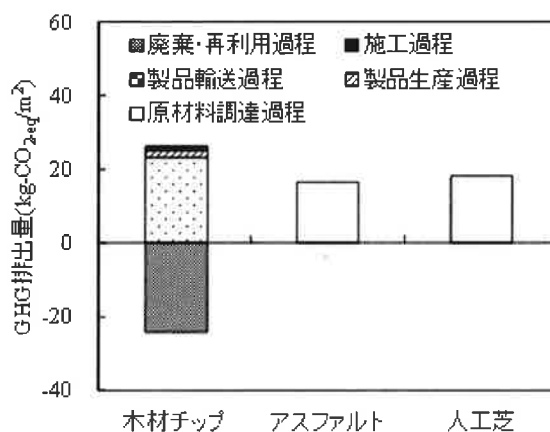


図6 舗装歩道のGHG排出量

### (4) 木製ガードレール<sup>11)</sup>

長野県で開発された2種類の木製ガードレール(支柱部分に鋼材、ビーム部分にスギ材と鋼材を使用した1号型、支柱部分に鉄筋コンクリート、ビーム部分にカラマツ材を使用した3号型)(図7)を対象に、ライフサイクルにおけるGHG排出量を評価しました。また、鋼製ガードレールや鋼製ガードパイプを木製ガードレールへ代替することによる削減効果も検討しました。木製のビーム部分に使われる木材は、塗装処理ケースと防腐処理ケースのどちらも対象とし、これまでの実績データ等を踏まえて、耐用年数をそれぞれ10年と20年としました。鋼製は耐用年数

を40年としました。評価期間を40年とすると、木製の塗装処理ケースは3回、木製の防腐処理ケースは1回の木材ビーム交換を行うこととなります。システム境界として、原材料調達・製品生産（木材では、育林、丸太生産、丸太輸送、製材生産、塗装処理あるいは防腐処理）、施工、維持管理（木材ビームの交換）、廃棄・再利用（廃木材の燃料利用、廃鉄・コンクリートの材料利用）のライフサイクル過程を対象とし、各過程における材料・燃料消費量からGHG排出量を算出しました。



1号型 3号型  
図7 木製ガードレール

評価期間40年の結果（図8）をみると、原材料調達過程から維持管理過程までの排出量では、木製3号型は鋼製よりも小さくなりますが、木製1号型は大きくなりました。木製3号型はビーム部分に木材だけを使用しているのに対し、木製1号型は鋼材も使用していることが排出量増加の要因です。木製1号型と3号型のどちらも、防腐処理ケースでは

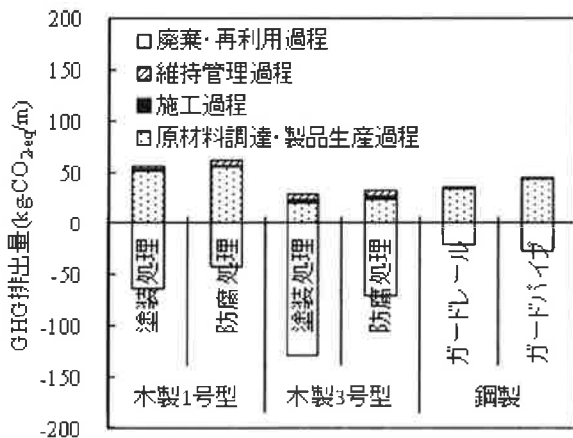


図8 ガードレールのGHG排出量

防腐剤の調達や加圧注入時の電力消費による排出量が大きく、塗装処理ケースの方が排出量は小さくなりました。また、廃棄・再利用過程において、廃木材の燃料利用による重油代替に伴って大きい削減効果が得られることが分かりました。鋼製ガードレールを木製3号型(塗装処理ケース)へ代替することによって、ガードレール1m当たり114kg-CO<sub>2</sub>-eqのGHG排出削減効果が得られます。

### (5) 木製遮音壁<sup>12)</sup>

長野県で開発された2種類の木製遮音壁（カラマツ製、スギ製）（図9）とコンクリート製遮音壁のライフサイクルにおけるGHG排出量を評価し、コンクリート製を木製へ代替することによる削減効果を検討しました。システム境界として、原材料調達・製品生産（木材では、育林、丸太生産、丸太輸送、製材生産、製材輸送、防腐処理）、製品輸送（製材輸送）、施工、廃棄・再利用（廃木材の燃料利用、廃鉄・コンクリートの材料利用）の各過程を対象とし、耐用年数は木製・コンクリート製ともに30年としました。

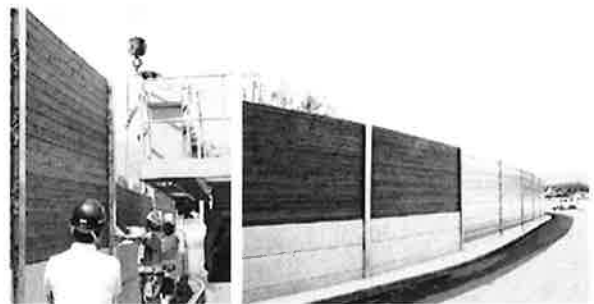


図9 カラマツ製遮音壁

評価期間30年の結果（図10）をみると、原材料調達過程から施工過程までの排出量は、カラマツ製が最も小さく、スギ製とコンクリート製の差はほとんどありませんでした。スギ製よりもカラマツ製の排出量が小さくなった要因は、難注入性であるカラマツの防腐剤使用量が少なく、防腐処理に関わる排

出量が小さくなったことが影響しています。廃棄・再利用過程を考慮すると、カラマツ製・スギ製ともに正味の排出量はコンクリート製よりも小さくなりました。コンクリート製をカラマツ製へ代替することにより、遮音壁 1m 当たり 91kg-CO<sub>2</sub>-eq の GHG 排出削減効果が見込まれます。

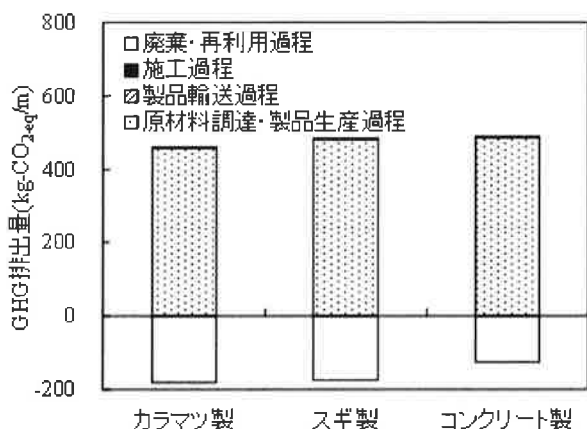


図 10 遮音壁の GHG 排出量

## 5. まとめ

5つの研究事例の結果から木製土木構造物の特徴をまとめると、まず、ライフサイクルの中で原材料調達・製品生産過程からの GHG 排出量が最も大きいことが挙げられます。また、木材の防腐処理に関わる排出量も大きく、防腐処理によって耐用年数が延長されることを考慮しても、防腐処理を行わない方が排出量は小さくなる傾向がみられました。一方、廃棄・再利用過程における廃木材の燃料利用による排出削減量は非常に大きく、構造物の解体・廃棄後に再利用を行うことが重要です。

非木製構造物との比較では、概ね木製構造物の方が GHG 排出量は小さくなりますが、鋼材や接着剤といった他材料と混合利用するものは、非木製構造物よりも GHG 排出量が大きくなる可能性があります。ただし、前述の通り、廃木材の燃料利用によって大幅な排出削減量が得られるため、非木製構造物を木製構造物へ代替することによる削減効果が期

待できます。

最後に、日本全体における今後の可能性について考えます<sup>13)</sup>。現状の丸太杭、木製治山ダム、木材チップ舗装歩道、木製ガードレール、木製遮音壁の施工実績および木材利用量は限られており、統計データ等から日本全体における正確な数値を把握することは難しい状況です。しかし、これら5用途における将来の木材利用可能量は、日本全体において最大で年間約 680 万 m<sup>3</sup> (丸太換算) と推定されています。この利用可能量に4章における LCA 結果を適用すると、材料代替効果として年間約 180 万 t-CO<sub>2</sub>-eq、燃料代替効果として年間約 80 万 t-CO<sub>2</sub>-eq の GHG 排出削減量が得られます。また、木材と森林(伐採跡地への再造林)における炭素貯蔵効果は、最大で年間約 700 万 t-CO<sub>2</sub>-eq が期待できます。ただし、炭素貯蔵効果を得るためには、森林において木材伐採後の再造林を行うことが不可欠です。材料代替効果、燃料代替効果、炭素貯蔵効果を合わせた地球温暖化緩和効果の合計は、2015年における日本全体の GHG 排出量の約 0.7% に相当します。地球温暖化対策として木材の土木利用が果たす役割は小さくないといえます。そのためには、長期的な木材利用の推進と森林における適切な更新を進めていくことが重要です。

## (参考文献)

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014): Climate Change 2014, Fifth Assessment Report, Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press, New York, USA.
- 2) 伊坪徳宏, 成田暢彦, 田原聖隆, 青木良輔, 稲葉敦 (2007): LCA 概論, 産業環境管理協会, 東京.
- 3) International Standards Organization (ISO) (2006): Environmental

- Management, Life-Cycle Assessment, Principles and Framework (ISO 14040), 2nd ed., ISO, Geneva, Switzerland.
- 4) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 社会とLCA研究グループ, 一般社団法人 産業環境管理協会 (2017): LCIデータベース IDEAv2, <https://www.aist-riss.jp/software/40166/>
  - 5) 国立研究開発法人 国立環境研究所 (2013): 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), [www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031\\_jpn/index\\_j.htm](http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031_jpn/index_j.htm)
  - 6) 伊坪徳宏, 稲葉敦 (2010): LIME2 意思決定を支援する環境影響評価手法, 産業環境管理協会, 東京.
  - 7) 加用千裕 (2017): 土木分野への木材利用による二酸化炭素排出削減効果, 土木技術者のための木材工学入門 (編集代表者: 本田秀行), 丸善出版, 東京, pp. 31-40.
  - 8) Chihiro Kayo, Seiji Hashimoto, Atsunori Numata, Masanori Hamada (2011): Reductions in greenhouse gas emissions by using wood to protect against soil liquefaction, *Journal of Wood Science* 57(3), pp. 234-240.
  - 9) Ryu Noda, Chihiro Kayo, Takanobu Sasaki, Shinya Takaoku (2014): Evaluation of CO<sub>2</sub> emissions reductions by timber check dams and their economic effectiveness, *Journal of Wood Science* 60(6), pp. 461-472.
  - 10) Chihiro Kayo, Chiaki Watanabe, Takanobu Sasaki, Seiki Kumagai, Ryu Noda, Seiji Hashimoto (2015): Life cycle greenhouse gas emissions of woodchip-paved walkways using tsunami salt-damaged wood-Examination in Otsuchi, Iwate Prefecture, *Journal of Wood Science* 61(6), pp. 620-629.
  - 11) Ryu Noda, Chihiro Kayo, Masato Yamanouchi, Naoaki Shibata (2016): Life cycle greenhouse gas emission of wooden guardrails-A study in Nagano Prefecture, *Journal of Wood Science* 62(2), pp. 181-193.
  - 12) 野田龍, 加用千裕, 山内仁人, 柴田直明 (2017): 長野県における木製遮音壁のライフサイクル GHG 排出量, *木材学会誌* 63(1), pp. 41-53.
  - 13) Chihiro Kayo, Ryu Noda (2018): Climate change mitigation potential of wood use in civil engineering in Japan based on life-cycle assessment, *Sustainability* 10(2), 561, doi: 10.3390/su10020561 <http://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/561>
- (著書)
- Chihiro Kayo (2013): Life Cycle Assessment (LCA) on Bioenergy, in *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems* edited by Seishu Tojo and Tadashi Hirasawa, Academic Press (Elsevier Inc.), pp. 310-317.
- 加用千裕 (2017): 土木分野への木材利用による二酸化炭素排出削減効果, 土木技術者のための木材工学入門 (編集代表者: 本田秀行), 丸善出版, 東京, pp. 31-40.
- (著者)
- 加用千裕 (かようちひろ) / 国立大学法人 東京農工大学大学院農学研究院准教授 / 博士 (工学) (東京大学)