長野県における木製遮音壁のライフサイクル GHG 排出量^{*1}野田 龍^{*2}, 加用千裕^{*3}, 山内仁人^{*4,5}, 柴田直明^{*5}Life Cycle Greenhouse Gas Emissions
of Wooden Roadside Noise Barriers in Nagano Prefecture^{*1}Ryu NODA^{*2}, Chihiro KAYO^{*3},
Masato YAMANOUCHI^{*4,5} and Naoaki SHIBATA^{*5}

The local government of Nagano prefecture, which leads the field of wooden noise barriers in Japan, has developed two types of wooden noise barriers (Japanese larch-made and Japanese cedar-made). It targeted these wooden noise barriers and concrete noise barriers to evaluate greenhouse gas (GHG) emissions throughout their lifecycle. The effect of replacing concrete noise barriers with wooden noise barriers on the reduction of GHG emissions was evaluated. The results showed that the total amount of GHG emissions, from raw material procurement to construction, by Japanese larch-made noise barriers was lower as compared to concrete noise barriers over an evaluation period of 30 years. After the service period ended, a GHG emission reduction effect by using disposed wood, steel and concrete as fuel and recycled material could be obtained. The results indicated that replacing concrete noise barriers with Japanese larch-made and Japanese cedar-made noise barriers resulted in emission reductions of 91 kg-CO₂eq and 62 kg-CO₂eq, respectively, for every 1 m length of the noise barrier.

Keywords: roadside noise barrier, life cycle assessment (LCA), greenhouse gas emissions, Nagano Prefecture.

日本における木製遮音壁の先進自治体である長野県において、同県で開発された2種類の木製遮音壁（カラマツ製、スギ製）とコンクリート製遮音壁を対象として、ライフサイクルにおける温室効果ガス（GHG）排出量を評価し、コンクリート製遮音壁を木製遮音壁に代替することによるGHG排出削減効果を明らかにした。その結果、評価期間30年における原材料調達から設置作業までのGHG排出量合計では、コンクリート製に比べ、スギ製は同等、カラマツ製はGHG排出量が少なくなることが明らかとなった。供用期間終了後の廃木材の燃料利用による重油代替および廃鉄、廃コンクリートによる材料代替を行えば、GHG排出削減に繋がり、また、コンクリート製を木製に代替することで遮音壁延長1mあたり、カラマツ製で91 kg-CO₂eq、スギ製では62 kg-CO₂eqのGHG排出削減効果が得られることが分かった。

^{*1} Received August 1, 2016; accepted August 25, 2016.

^{*2} 秋田大学大学院理工学研究科 Department of Systems Design Engineering, Graduate School of Engineering Science, Akita University, Akita 010-8502, Japan

^{*3} 東京農工大学大学院農学研究科 Department of Environment Conservation, Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-8509, Japan

^{*4} 長野県上伊那地方事務所 Nagano Prefecture Kamiina Regional Office, Nagano 396-8666, Japan

^{*5} 元 長野県林業総合センター Formerly, Nagano Prefectural Forestry Research Center, Nagano 399-0711, Japan
Corresponding author: R. Noda (noda@gipc.akita-u.ac.jp)

1. 緒 言

近年、地球温暖化問題への対応や利用適齢期を迎えた人工林の有効活用といった観点から、木材の有効利用が求められている。中でも、近年は土木分野への木材利用が推進され、そのひとつとして木製遮音壁が注目されており、技術開発や普及が進められている^{1, 2)}。日本全体における遮音壁への木材利用可能量(丸太換算)は年間約9万m³と試算されている³⁾。

木材は鉄鋼やアルミニウムといった他の材料と比べて製品製造時のエネルギー消費量およびCO₂排出量が小さいことから⁴⁾、木材利用によって地球温暖化の緩和に貢献できる。他材料から木材への代替による地球温暖化緩和効果を検討する際、資源の採取から製品が製造され、廃棄されるまでのライフサイクル全体に関わる環境負荷を考慮するライフサイクルアセスメント(LCA)の適用が必要である。

LCA手法を用いた木材利用による温室効果ガス(GHG)排出削減効果について、これまで多くの研究が進められており、土木構造物に着目した先行研究としては、地盤の液状化対策に用いる木杭工法⁵⁾、溪流の荒廃防止対策に用いられる木製治山ダム⁶⁾や木製ガードレールを対象にした事例⁷⁾などがある。これらの先行研究の全てで、木材の他材料代替によるGHGまたはCO₂排出削減効果が確認されている。ただし、鉄鋼等の他材料と混合利用する木製構造物はGHG排出削減効果が得られない可能性も示されている。一方、遮音壁への木材利用によるLCAの先行研究はこれまで報告されておらず、木製遮音壁によるGHG排出削減効果は定量的に明らかになっていない。

そこで、本研究では、日本における木製遮音壁の開発・普及の先進自治体である長野県において、同県で開発された2種類の木製遮音壁(カラマツ、スギ)および施工実績の多いコンクリート製遮音壁を対象として、ライフサイクルにおけるGHG排出量を評価し、コンクリート製遮音壁を木製遮音壁へ代替することによるGHG排出削減効果を明らかにする。

2. 評価方法

2.1 対象とした遮音壁

評価対象とした木製遮音壁は従来の木製遮音板¹⁾に対して、遮音性能を長期にわたって維持しつつ、製造工程等の簡略化により低コスト化を実現した改良タイプ(角型、遮音板は反射型)⁸⁾とし、カラマ

ツ製とスギ製の2種を遮音板(反射型)として一般的なコンクリート製遮音壁と比較した。遮音壁の構造形式はFig.1に示すように、支柱と基礎部は標準タイプを、遮音壁高さは設置事例が多いタイプを選定した。具体的には、基礎部は鋼管杭タイプ、支柱はH形鋼で高さは4.0m、遮音板の高さは3.0m、土留板の高さ1.0mである。木製の場合、遮音板の上2.0m分を木製、下1.0m分はコンクリート製とした。木製遮音板はカラマツ製、スギ製ともに高さ10cmの角材5本をボルトで連結して1パネルとしたものを4枚取り付け2.0mとしている。なお、木製、コンクリート製の諸性能はともに遮音壁設計要領⁹⁾に準拠した構造であり、機能単位は統一されている。具体的には、400 Hzに対して25 dB以上、1000 Hzに対して30 dB以上の音響透過損失を有し、かつ、風荷重(土工部で1.5 kN/m²)に耐える構造である。

2.2 ライフサイクル GHG 排出量の評価方法

評価の対象としたライフサイクル過程は、原材料調達・製品生産、製品輸送、設置作業、廃棄・再利用の各過程とし、評価対象範囲(システム境界)をFig.2に示す。図中の囲み線実線が本研究で評価対象とした過程、破線は評価対象外とした過程、網掛けは廃材の再利用による新規製品の代替過程を示す。各過程における化石燃料消費由来のGHG(CO₂, CH₄, N₂O)排出量を算出した。木材の炭素貯蔵については考慮しなかった。また、木材の燃焼により発生するCO₂については、カーボンニュートラルの考え方を適用し、本稿では評価対象外としたが、CH₄とN₂OはISOの規定¹⁰⁾に従い評価対象に含めることとした。各GHGは地球温暖化係数100年値(GWP₁₀₀)(CO₂: 1, CH₄: 34, N₂O: 298)¹¹⁾を用いてCO₂換算(kg-CO₂-eq)で示した。機能単位は、各遮音壁延長1m当たりのGHG排出量(kg-CO₂-eq/m)とした。

本研究における耐用年数は、木製遮音壁、コンクリート製遮音壁のどちらも30年と想定した。これについて木製では、厳密には木材により薬剤保存処理の品質や耐久性は異なるものの、長野県内に設置された木製遮音壁において設置後30年が経過した木材を回収し、音響性能試験、強度試験を行った結果、必要十分な機能を維持していることが確認されている¹²⁾ので、妥当な設定値だと考えている。コンクリート製では、遮音壁の機能が維持される期間として、18年という試算が得られている¹³⁾。これは、かつての首都公団および阪神公団にて過去の更新実績から算定された数値である。しかし、更新理由は社会情勢の変化等によるもので、機能低下によって使

(a) wooden type

(b) concrete type

Fig. 1. Types of noise barriers (unit: mm).

用に耐えられなくなったわけではない。また、交通量の大小、気温変化、凍結防止剤の散布量等によって機能低下の程度は大きく異なることが考えられることから、本研究ではコンクリート製遮音壁の耐用年数は木製のそれと同じとした。なお、高速道路に設置する遮音壁は快適な道路空間を確保するため、コンクリート製、金属製に関わらず、遮音壁前面に修景緑化として低木等の植栽を行うのが一般的¹⁴⁾であり、定期的に車線規制を行って植栽の剪定等の維持管理を行う必要がある。しかし、その頻度、工程等是不明であった。一方、長野県内に設置されている木製遮音壁では、その特徴からか、既往設置箇所では植栽されておらず、維持管理は行われていない。また、本木製遮音壁は加圧注入による防腐処理

材を使用しており、定期的な塗装作業は発生しない。従って、本研究においては、いずれの遮音壁についても維持管理によるGHG排出量は評価しなかった。

GHG排出量を評価する際のフォアグラウンドデータとして収集した材料・燃料使用量をTable 1に示す。木製遮音壁およびコンクリート製遮音壁の材料使用量は長野県林業総合センターから、木製遮音板の製造過程時の人工乾燥に伴う燃料使用量は瑞穂木材株式会社から、木製遮音板の防腐処理による電力使用量は株式会社ランバーテックからそれぞれ収集した。人工乾燥は含水率調整のために行っており、カラマツ、スギともに乾燥処理条件、日数は同じである。バックグラウンドデータとして用いたGHG排出量原単位をTable 2に示す。次項よりライフサ

Fig. 2. Life cycle process (system boundary).

イクル過程ごとに評価方法を詳述する。

2.2.1 原材料調達・製品生産過程

原材料調達・製品生産過程は、遮音壁に使用する材料や燃料の資源採取から資源輸送および製品生産までを考慮した。これらの GHG 排出量は、各材料および燃料の使用量 (Table 1) に各材料・燃料の GHG 排出量原単位 (Table 2) を乗じることにより算出した。ここで、木製遮音板に使用される木材については育林、丸太生産、丸太生産現場から製材現場までの丸太輸送、製材生産、人工乾燥、製材現場から防腐処理現場までの製材輸送、防腐剤調達、防腐処理の各段階を対象とした。育林から製材生産までの各段階では製材使用量に製材 (ひき角類) の生産による GHG 排出量原単位を、人工乾燥では人工

乾燥を行う際の重油使用量に製材使用量および重油の生産・燃焼による GHG 排出量原単位を、製材輸送では製材使用量に密度および製材現場から防腐処理現場までの製材輸送距離および 10 t トラックの輸送 (積載率 100%) による GHG 排出量原単位を乗じて求めた。製材の密度は乾量基準の含水率 20%¹⁷⁾ および全乾密度 (カラマツ: 404 BDkg/m³, スギ: 314 BDkg/m³)¹⁸⁾ を用いて求めた。防腐剤調達では、防腐剤 (ACQ) 使用量に製材使用量および防腐剤の調達による GHG 排出量原単位を、防腐処理では防腐処理を行う際の電力使用量に製材使用量および電力の使用による GHG 排出量原単位を乗じることにより算出した。丸太輸送および製材輸送に係る運搬では、往路または復路にて別用途の材料運搬を行

Table 1. Amounts of material and energy used and substituted.

			Wooden			
			Unit	Japanese larch	Japanese cedar	Concrete
Raw material procurement and production process	Wooden noise barrier panel	lumber consumption ^{a)}	m ³ /m	1.47×10^{-1}	1.76×10^{-1}	—
		oven-dry density	kg/m ³	4.04×10^2	3.14×10^2	
		heavy oil consumption for artificial drying ^{b)}	L/m ³	3.43×10	3.43×10	—
		transport distance from the sawmilling factory to the pressure injection factory ^{a)}	km	1.27×10^2	1.27×10^2	—
		density at the time of transportation	kg/m ³	4.85×10^2	3.77×10^2	
		preservative (ACQ) ^{c)}	kg/m ³	9.00	2.40×10	—
		electricity consumption for pressure injection ^{c)}	kWh/m ³	3.33×10	3.33×10	—
		stainless steel bar ^{a)}	kg/m	1.61	1.61	—
	Concrete noise barrier panel, retaining panel	concrete ^{a)}	m ³ /m	1.93×10^{-1}	1.93×10^{-1}	3.71×10^{-1}
		steel bar ^{a)}	kg/m	2.20×10	2.20×10	4.40×10
	Support post	steel rolling ^{a)}	kg/m	6.70×10	6.70×10	6.70×10
		zinc galvanizing ^{a)}	kg/m	6.21×10^{-1}	6.21×10^{-1}	6.21×10^{-1}
	Foundation	carbon steel post ^{a)}	kg/m	1.26×10^2	1.26×10^2	1.26×10^2
		concrete ^{a)}	m ³ /m	3.50×10^{-2}	3.50×10^{-1}	3.50×10^{-1}
		steel bar ^{a)}	kg/m	2.00	2.00	2.00
Product transportation process	Wooden noise barrier panel	transport distance from the pressure injection factory to the installation site ^{a)}	km	6.25×10	6.25×10	—
		density at the time of transportation	kg/m ³	4.85×10^2	3.77×10^2	
Construction process		light oil consumption	L/m	1.27	1.27	1.27
Disposal and recycling process	Disposed materials	disposed wood ^{a)}	m ³ /m	1.47×10^{-1}	1.76×10^{-1}	—
		light oil consumption for wooden chip production ^{d)}	L/m ³	1.50	1.50	—
		disposed steel ^{a)}	kg/m	8.90×10	8.90×10	1.11×10^2
		disposed concrete ^{a)}	m ³ /m	1.93×10^{-1}	1.93×10^{-1}	3.71×10^{-1}
	Substituted fuels and materials	A-type heavy oil	L/m	2.71×10	2.53×10	—
		crude steel	kg/m	8.01×10	8.01×10	9.99×10
		aggregate	m ³ /m	1.93×10^{-1}	1.93×10^{-1}	3.71×10^{-1}

Note: a) An interview survey with Nagano Prefectural Forestry Research Center

b) An interview survey with Mizuho Mokuzai Co. Ltd.

c) An interview survey with Lumbertech Co. Ltd.

d) An interview survey with agricultural public corporations

っていることから、輸送距離は片道分とした。

2.2.2 製品輸送過程

製品輸送過程は、木製遮音板では防腐処理現場から設置現場までの製材輸送による GHG 排出量を対象とし、製材使用量に密度、輸送距離および10tトラックの輸送による GHG 排出量原単位を乗じることにより求めた。設置現場は既往設置現場の一つを任意に選択し、そこまでの製材輸送距離を設定した。これについては、関係者へのヒアリング調査結果よ

り、今後長野県内で新たに木製遮音壁が設置されることを考慮した際、県内の移動距離として妥当な範囲内と考えている。なお、密度は前項(2.2.1)と同様の方法で算定した。その他の製品の輸送については、輸送経路の詳細を把握することができなかったため、対象外とした。

2.2.3 設置作業過程

遮音壁の設置作業過程は、木製2種とコンクリート製ではほぼ同様の工程、重機使用時間となる。そ

Table 2. Greenhouse gas (GHG) emission intensities.

		Unit	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GHG total	Scope of assessment	Source
Raw material procurement and production process	lumber (sawn timbers) production	kg-CO ₂ eq/m ³	5.67 × 10	1.51	9.21 × 10 ⁻¹	5.91 × 10	silviculture ~ log production ~ lumber production	15)
	A-type heavy oil production and combustion	kg-CO ₂ eq/L	2.99	1.14 × 10 ⁻¹	1.48 × 10 ⁻²	3.12	resource extraction ~ heavy oil production ~ heavy oil combustion	15)
	Wooden noise barrier panel	kg-CO ₂ eq/kg	-	-	-	6.31	preservative (ACQ) procurement	16)
	electricity consumption for pressure injection	kg-CO ₂ eq/kWh	5.92 × 10 ⁻¹	4.39 × 10 ⁻³	1.75 × 10 ⁻²	6.13 × 10 ⁻¹	resource extraction ~ electric power generation	15) a)
	transportation by 10 ton truck	kg-CO ₂ eq/(t·km)	1.26 × 10 ⁻¹	4.81 × 10 ⁻³	6.26 × 10 ⁻⁴	1.32 × 10 ⁻¹	resource extraction ~ light oil production ~ light oil combustion	15)
	stainless bar production	kg-CO ₂ eq/kg	3.93	5.61 × 10 ⁻²	3.83 × 10 ⁻²	4.03	resource extraction ~ stainless bar production	15)
	freshly mixed concrete production	kg-CO ₂ eq/m ³	2.90 × 10 ²	2.82	1.06	2.93 × 10 ²	resource extraction ~ freshly mixed concrete production	15)
	Concrete noise barrier panel, retaining barrier	kg-CO ₂ eq/kg	8.60 × 10 ⁻¹	8.89 × 10 ⁻³	7.90 × 10 ⁻³	8.77 × 10 ⁻¹	resource extraction ~ steel bar production	15)
	steel rolling production	kg-CO ₂ eq/kg	1.38	2.31 × 10 ⁻²	7.13 × 10 ⁻³	1.41	resource extraction ~ steel rolling production	15)
	zinc galvanizing production	kg-CO ₂ eq/kg	2.89 × 10 ⁻¹	3.68 × 10 ⁻³	6.81 × 10 ⁻³	2.99 × 10 ⁻¹	resource extraction ~ zinc galvanizing production	15)
Foundation	carbon steel post production	kg-CO ₂ eq/kg	1.80	3.24 × 10 ⁻²	1.04 × 10 ⁻²	1.85	resource extraction ~ carbon steel post production	15)
	freshly mixed concrete production	kg-CO ₂ eq/m ³	2.90 × 10 ²	2.82	1.06	2.93 × 10 ²	resource extraction ~ freshly mixed concrete production	15)
	steel bar production	kg-CO ₂ eq/kg	8.60 × 10 ⁻¹	8.89 × 10 ⁻³	7.90 × 10 ⁻³	8.77 × 10 ⁻¹	resource extraction ~ steel bar production	15)
	transportation by 10 ton truck	kg-CO ₂ eq/(t·km)	1.26 × 10 ⁻¹	4.81 × 10 ⁻³	6.26 × 10 ⁻⁴	1.32 × 10 ⁻¹	resource extraction ~ light oil production ~ light oil combustion	15)
Product transportation process	light oil production and combustion	kg-CO ₂ eq/L	2.82	1.07 × 10 ⁻¹	1.40 × 10 ⁻²	2.94	resource extraction ~ light oil production ~ light oil combustion	15)

Disposal and recycling process	light oil production and combustion	kg-CO _{2eq} /L	282	1.07 × 10 ⁻¹	1.40 × 10 ⁻²	2.94	resource extraction ~ light oil production ~ light oil combustion	15)
	wood combustion	kg-CO _{2eq} /GJ	-	2.52	1.73 × 10 ⁻¹	2.69	wood combustion (CO ₂ not evaluated)	15)
	recycled aggregate production	kg-CO _{2eq} /kg	3.73 × 10 ⁻³	6.05 × 10 ⁻⁵	8.36 × 10 ⁻⁵	3.87 × 10 ⁻³	recycled aggregate production	15)
	steel scrap processing	kg-CO _{2eq} /kg	1.67 × 10 ⁻²	3.29 × 10 ⁻⁴	2.53 × 10 ⁻⁴	1.72 × 10 ⁻²	steel scrap processing	15)
Disposed materials	recycled crude steel production (electric arc furnace)	kg-CO _{2eq} /kg	5.84 × 10 ⁻¹	5.51 × 10 ⁻³	5.22 × 10 ⁻³	5.95 × 10 ⁻¹	crude steel production (electric arc furnace) from steel scrap	15)
	A-type heavy oil production and combustion	kg-CO _{2eq} /L	299	1.14 × 10 ⁻¹	1.48 × 10 ⁻²	3.12	resource extraction ~ heavy oil production ~ heavy oil combustion	15)
Substituted fuels and materials	aggregate production	kg-CO _{2eq} /kg	426 × 10 ⁻³	1.27 × 10 ⁻³	4.91 × 10 ⁻⁵	4.43 × 10 ⁻³	resource extraction ~ aggregate production	15)
	crude steel production (basic oxygen furnace)	kg-CO _{2eq} /kg	1.44	3.07 × 10 ⁻²	3.93 × 10 ⁻³	1.47	resource extraction ~ crude steel production (basic oxygen furnace)	15)

Note : a) The value of Chubu Electric Power Co., Inc.

ここで、遮音壁設置工事歩掛り¹⁹⁾を用いて、支柱建込、土留板設置、遮音板設置の各工程におけるクレーン装置付トラック（車両重量4.0 t、最大吊上荷重2.9 t）の使用時間を求め、軽油消費量を算出した。軽油消費量に軽油の生産・燃焼による GHG 排出量原単位を乗じることにより、設置作業過程の GHG 排出量を算出した。

2.2.4 廃棄・再利用過程

廃棄・再利用過程では、廃木材の再利用において、燃料利用による重油代替を検討した。具体的には、廃木材をチップ化し、チップボイラーによって熱供給を行うことで重油ボイラーと代替することを想定した。なお、廃木材の材料利用も考えられるが、防汚処理材であるため、木質リサイクルチップの品質規格²⁰⁾に従って燃料利用を対象とした。以下の式(1)～(4)によって廃木材の燃料利用による GHG 排出削減量を算定した。

$$RGE = GEO - GEW \quad \dots (1)$$

$$GEO = \frac{DWB \times d \times CW \times ehw \times e_h}{CH \times ehh} \quad \dots (2)$$

$$GEW = DWB \times l_c \times e_l + DWB \times d \times CW \times e_w \quad \dots (3)$$

$$CW = gc_0 - 2.512 \times (9 \times h_0 + u_0) \quad \dots (4)$$

ここで、RGE：廃木材由来のチップの重油代替による GHG 排出削減量、GEO：廃木材由来のチップにより代替される重油の生産・燃焼による GHG 排出量、GEW：チップの生産・燃焼による GHG 排出量、DWB：廃木材発生量、 d ：廃木材（製材）の全乾密度、CW：木材の低位発熱量（全乾時）(GJ/BDkg)、ehw：木質チップボイラーの熱利用効率(0.775)²¹⁾、CH：重油の低位発熱量(0.037 GJ/L)²²⁾、ehh：重油ボイラーの熱利用効率(0.885)²¹⁾、 e_h ：重油の生産・燃焼による GHG 排出量原単位、 l_c ：廃木材からのチップ生産による軽油消費量、 e_l ：軽油の生産・燃焼による GHG 排出量原単位、 e_w ：木材の燃焼による GHG 排出量原単位、 gc_0 ：木材の高位発熱量（全乾時）(0.021 GJ/BDkg)²³⁾、 h_0 ：水素含有率（全乾時）(0.06 kg/BDkg)²³⁾、 u_0 ：乾量基準の含水率20% (0.2 kg/BDkg)を示す。

DWBは先行研究¹²⁾を参考に、木材の腐朽等による質量ないし材積の減少はないものとし、製材使用量と同量とした。算定の結果、木材の低位発熱量(CW)は、0.0191 GJ/BDkgとなった。

廃鉄、廃コンクリートについては、日本全体における再利用率が95%以上^{24, 25)}である。そこで本研究においても再利用を検討することとする。鉄スクラップは主に電炉法によって鉄鋼製品の原料に再利

用されている²⁶⁾。コンクリートでは低炭素・循環型社会への貢献を目指して、再生骨材コンクリートの利用・普及が図られている²⁷⁾。そこで再利用方法として、廃鉄からの再生粗鋼（電炉法）生産による新規の鉄鉱石からの粗鋼（転炉法）との代替、廃コンクリートからの再生骨材生産による新規の骨材との代替を想定した。下記の式（5）～（9）によって、廃鉄、廃コンクリートの材料利用による GHG 排出削減量を算定した。

$$\text{RGM} = \text{GEM}_s - \text{GER}_s + \text{GEM}_c - \text{GER}_c \quad \cdots (5)$$

$$\text{GEM}_s = \text{DST} \times y_s \times e_s \quad \cdots (6)$$

$$\text{GER}_s = \text{DST} \times r_d + \text{DST} \times y_s \times r_s \quad \cdots (7)$$

$$\text{GEM}_c = \text{DCO} \times d_c \times e_c \quad \cdots (8)$$

$$\text{GER}_c = \text{DCO} \times d_c \times r_c \quad \cdots (9)$$

ここで、RGM：廃鉄、廃コンクリートの材料代替による GHG 排出削減量、 GEM_s ：新規の粗鋼（電炉法）の生産による GHG 排出量、 GER_s ：廃鉄からの再生粗鋼（電炉法）の生産による GHG 排出量、 GEM_c ：新規の骨材の生産による GHG 排出量、 GER_c ：廃コンクリートからの再生骨材の生産による GHG 排出量、DST：廃鉄発生量、 y_s ：電炉法における鉄スクラップから再生粗鋼への歩留まり（0.9）²⁸⁾、 e_s ：粗鋼（転炉法）の生産による GHG 排出量原単位、 r_d ：鉄スクラップの加工処理による

GHG 排出量原単位、 r_s ：再生粗鋼（電炉法）の生産による GHG 排出量原単位、DCO：廃コンクリート発生量、 d_c ：コンクリートの容積密度（2400 kg/m³）¹⁵⁾、 e_c ：骨材（碎石）の生産による GHG 排出量原単位、 r_c ：再生骨材（路盤材用）の生産による GHG 排出量原単位を示す。廃コンクリートから再生骨材（路盤材用）を生産する際、破碎処理を繰り返すことによってコンクリート粉分の喪失が考えられるが、路盤材として使用される場合の廃コンクリートは粗割材であり、破碎処理回数は少ない²⁹⁾。よって、粉分の喪失を重量換算で考えると微々たるものと判断し、廃コンクリート発生量の全量を再利用するとして試算した。

また、長野県内において設置後30年を経過した遮音壁は現存しており、実状に即した解体方法や廃棄処理・再利用場所等が定かでないため、遮音壁の解体およびチップ（廃木材）、廃鉄、廃コンクリートの輸送による GHG 排出量は対象外とした。

3. 結果と考察

遮音壁延長 1 m あたりの評価期間30年における GHG 排出量の評価結果を Table 3, Fig. 3 に示す。

3.1 木製遮音壁のライフサイクル GHG 排出量

原材料調達・製品生産過程から設置作業過程まで

Table 3. Evaluation result for greenhouse gas (GHG) emissions over a 30-year evaluation period (+ : emissions, - : reductions). Unit : kg-CO_{2,eq}/m

		Wooden		Concrete
		Japanese larch	Japanese cedar	
Service life (year)		30	30	30
Raw material procurement and production process	support post production	9.46 × 10	9.46 × 10	9.46 × 10
	wooden noise barrier panel production	4.22 × 10	6.61 × 10	
	concrete noise barrier panel, retaining panel production	7.59 × 10	7.59 × 10	1.48 × 10 ²
	foundation production	2.45 × 10 ²	2.45 × 10 ²	2.45 × 10 ²
	wooden noise barrier panel transportation (from the sawmilling factory to the pressure injection factory)	1.19	1.11	
Product transportation process	wooden noise barrier panel transportation (from the pressure injection factory to the installation site)	5.88 × 10 ⁻¹	5.48 × 10 ⁻¹	
Construction process		3.73	3.73	3.73
Disposal and recycling process	energy use of disposed wood	- 8.08 × 10	- 7.52 × 10	
	material use of disposed steel and concrete	- 6.92 × 10	- 6.92 × 10	- 8.65 × 10
Total	GHG emissions (raw material procurement — construction process)	4.63 × 10 ²	4.87 × 10 ²	4.91 × 10 ²
	Net GHG emissions (raw material procurement — disposal and recycling process)	3.13 × 10 ²	3.42 × 10 ²	4.04 × 10 ²

Fig. 3. Evaluation result for greenhouse gas (GHG) emissions over a 30-year evaluation period.

の GHG 排出量の合計は、カラマツ製 463 kg-CO₂eq/m、スギ製 487 kg-CO₂eq/m となった。カラマツ製とスギ製で約 24 kg-CO₂eq/m の差が生じている最大の要因は、木製遮音板の原材料調達・製品生産過程のうち、防腐剤使用量の差によるものである。

ライフサイクル過程ごとにみると、カラマツ製、スギ製ともに、GHG 排出量合計のうち、原材料調達・製品生産過程が 99.1%、製品輸送過程が 0.1%、設置作業過程が 0.8% となり、GHG 排出量のほぼすべてを原材料調達・製品生産過程が占めていることが明らかとなった。この傾向は、土木構造物を対象としたこれまでの先行研究⁵⁻⁷⁾と同様の結果である。原材料調達・製品生産過程は支柱生産、木製遮音板生産、コンクリート製遮音板・土留板生産、基礎部生産、製材輸送の各過程に分かれる。それらの排出割合をみると、カラマツ製ではそれぞれ 20.4%、9.1%、

16.4%、52.9%、0.2%、スギ製ではそれぞれ 19.4%、13.6%、15.6%、50.3%、0.2% となり、非木製である支柱、コンクリート製遮音板・土留板および基礎部の生産過程が排出量の大部分を占めていることが分かった。一方、製材輸送過程からの GHG 排出量は全体のわずか 0.2% にすぎなかった。本研究では、長野県内における事例を元に輸送距離を算定したが、県産材や近隣地産材を使用する場合は、異なる地域であっても同様の結果が得られると考えられ、輸送過程からの GHG 排出量がライフサイクル全体に与える影響は小さいと考えられる。

廃棄・再利用過程に着目すると、廃木製遮音板の燃料利用による重油代替に伴い、カラマツ製では 80.8 kg-CO₂eq/m、スギ製では 75.2 kg-CO₂eq/m の GHG 排出削減効果が得られた (Table 3)。これはライフサイクル GHG 排出量のうち、カラマツ製で

Table 4. Sensitivity analysis for service life over a 60-year evaluation period (+ : emissions, - : reductions). Unit : kg-CO₂eq/m

	Wooden						Concrete		
	Japanese larch			Japanese cedar					
Service life (year)	30	20	40	30	20	40	30	20	40
Raw material procurement and production process	support post production	1.89×10 ²	2.84×10 ²	1.89×10 ²	1.89×10 ²	1.89×10 ²	1.89×10 ²	2.84×10 ²	1.89×10 ²
	wooden noise barrier panel production	8.45×10	1.27×10 ²	8.45×10	1.98×10 ²	1.32×10 ²			
	concrete noise barrier panel, retaining panel production	1.52×10 ²	2.28×10 ²	1.52×10 ²	2.28×10 ²	1.52×10 ²	2.95×10 ²	4.43×10 ²	2.95×10 ²
	foundation production	2.45×10 ²	2.45×10 ²	2.45×10 ²	2.45×10 ²	2.45×10 ²	2.45×10 ²	2.45×10 ²	2.45×10 ²
Product transportation process	wooden noise barrier panel transportation (from the sawmilling factory to the pressure injection factory)	2.39	3.58	2.39	2.23	3.34	2.23		
	wooden noise barrier panel transportation (from the pressure injection factory to the installation site)	1.18	1.76	1.18	1.10	1.64	1.10		
Construction process		7.46	1.12×10	7.46	7.46	1.12×10	7.46	1.12×10	7.46
Disposal and recycling process	energy use of disposed wood material	-1.62×10 ²	-2.43×10 ²	-8.08×10	-1.50×10 ²	-2.26×10 ²	-1.73×10 ²	-2.59×10 ²	-8.65×10
	use of disposed steel and concrete	-1.38×10 ²	-2.08×10 ²	-6.92×10	-1.38×10 ²	-2.08×10 ²			
Total	GHG emissions (raw material procurement — construction process)	6.81×10 ²	9.00×10 ²	6.81×10 ²	7.29×10 ²	9.71×10 ²	7.36×10 ²	9.82×10 ²	7.36×10 ²
	Net GHG emissions (raw material procurement — disposal and recycling process)	3.81×10 ²	4.49×10 ²	5.31×10 ²	4.40×10 ²	5.38×10 ²	5.63×10 ²	7.23×10 ²	6.50×10 ²

17.5%, スギ製で15.4%に相当する。さらに、廃コンクリート、廃鉄の材料代替に伴う GHG 排出削減量を考慮すると、GHG 排出量の合計をカラマツ製で32.4%, スギ製で29.7%削減することが可能となり、廃棄過程におけるエネルギー利用および材料代替の有無は、ライフサイクル GHG 排出量全体に対して非常に大きい影響があることが分かった。

3.2 木製遮音壁とコンクリート製遮音壁の比較

木製2種とコンクリート製を比較すると、原材料調達・製品生産過程から設置作業過程までの GHG 排出量の合計はコンクリート製で491 kg-CO₂-eq/m となり、カラマツ製ではコンクリート製よりも GHG 排出量は少なく、スギ製では同程度の結果が得られた (Table 3)。

廃棄・再利用過程における廃鉄、廃コンクリートの材料代替に伴い、コンクリート製の正味の GHG 排出量は404 kg-CO₂-eq/m となり、カラマツ製313 kg-CO₂-eq/m、スギ製342 kg-CO₂-eq/m に比べて小さくなった。つまり、コンクリート製を木製に代替し、かつ廃材を再利用することで、カラマツ製では91 kg-CO₂-eq/m、スギ製では62 kg-CO₂-eq/m の GHG 排出削減効果が得られることが明らかとなった。

原材料調達・製品生産過程のうち、人工乾燥を行う際に使用している重油ボイラーをチップボイラーに変更した場合、さらなる GHG 排出削減の可能性がある。そこで、重油利用をチップ利用に変えた場合の GHG 排出量の試算を行う。まず、人工乾燥に使用する重油は34.3 L/m³ (Table 1) である。遮音壁延長1 m あたりの重油使用量は製材使用量 (Table 1) からカラマツ製5.04 L、スギ製6.05 L となる。2.2.4で述べた計算方法を用いると、低位発熱量とボイラーの熱利用効率から、重油使用量に相当するチップ使用量はカラマツ製0.027 m³、スギ製0.042 m³となる。これらの数値を式 (1) ~ (4) に代入して求めたところ、重油ボイラーをチップボイラーに変更することで、カラマツ製15 kg-CO₂-eq/m、スギ製で18 kg-CO₂-eq/m の GHG 排出削減効果が得られる結果となった。ここでは、木材からチップの生産に伴う軽油消費量は考慮していない。以上より、人工乾燥処理を重油ボイラーからチップボイラーに変更したうえで、コンクリート製を木製に代替し、かつ廃材を再利用した場合、遮音壁延長1 m あたりカラマツ製で106 kg-CO₂-eq、スギ製で80 kg-CO₂-eq の GHG 排出削減に繋がることが分かった。

また、2.2で述べた通り、本研究では木製・コンクリート製ともに耐用年数を30年と設定したが、これらは交通量や気候等の周辺環境の状況によって変

化し得ると考えられ、不確実性が含まれている。そこで、耐用年数の感度分析を行い、結果への影響を考察することとする。耐用年数が現状の30年から10年短縮あるいは延長され20年と40年になることを想定した。評価期間を60年とし、それぞれの耐用年数経過後に支柱、遮音板、土留板を新規に交換することとし、それに伴う原材料調達・製品生産、製品輸送、設置作業、廃棄・再利用の各過程における GHG 排出量・削減量を計上した。感度分析の結果 (Table 4)、いずれのシナリオにおいても木製の方がコンクリート製よりも GHG 排出量が少なく、耐用年数が現状から変化してもコンクリート製を木製に代替することによる GHG 排出削減効果は得られると考えられる。

さらに、2.2で述べたように、高速道路に設置されるすべての遮音壁は原則、修景緑化を施すのが一般的であるが、木製遮音壁の場合、その特性から修景緑化を施す必然性に乏しく、植栽を省略することは可能と思われる。植栽を省略できれば、定期的な交通規制による事故防止予防につながるだけでなく、維持管理費の大幅な削減、維持管理時の車両運転に伴う GHG 排出削減等も期待できる。また、既往の研究から、植栽がない方が木製遮音板は腐朽しにくいという結果も得られている³⁰⁾。

以上のことから、修景緑化を省略し、木製遮音壁の利用を拡大させることは、地球温暖化緩和効果に加え、交通事故の防止、経費節減につながる可能性がある。

4. 結 論

本研究では、長野県において新たに開発された2種の木製遮音壁 (反射型、角材タイプ、カラマツ製およびスギ製) と反射型遮音壁として一般的なコンクリート製遮音壁を対象に、ライフサイクルにおける GHG 排出量 (CO₂, CH₄, N₂O) を評価し、非木製と比較した木製遮音壁の GHG 排出削減効果の検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

1. 評価期間30年における原材料調達から設置作業までの GHG 排出量合計では、コンクリート製491 kg-CO₂-eq/m に比べ、木製 (カラマツ) 463 kg-CO₂-eq/m、木製 (スギ) 487 kg-CO₂-eq/m となり、カラマツ製で GHG 排出量は少なく、スギ製では同程度であった。
2. 廃木材の燃料利用による重油代替および廃鉄、廃コンクリートによる材料代替を行うことで GHG 排出量の削減に繋がり、特に、廃木材の燃料利用による重油代替に伴い、木製 (カラマツ)

では80.8 kg-CO_{2-eq}/m, 木製(スギ)では75.2 kg-CO_{2-eq}/mのGHG排出削減効果が得られ、廃棄・再利用過程におけるエネルギー利用の有無は、ライフサイクルGHG排出量全体に対して非常に大きい影響があった。

3. コンクリート製を木製に代替することで、廃材の燃料利用および材料利用を前提とすれば、木製(カラマツ)では91 kg-CO_{2-eq}/m, 木製(スギ)では62 kg-CO_{2-eq}/mのGHG排出削減効果が得られる。人工乾燥処理を重油ボイラーではなく、チップボイラーで行った場合、木製(カラマツ)では15 kg-CO_{2-eq}/m, 木製(スギ)では18 kg-CO_{2-eq}/mのさらなるGHG排出削減効果が得られる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、瑞穂木材株式会社、大栄産業株式会社、株式会社ランバーテックの関係各位には多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。また、本研究は、長野県信州の木先進的利用加速化事業(県産材による高性能・低コスト木製遮音板開発事業)「長野県産材木製遮音壁のLCA調査」およびJSPS科研費16K21023, MEXT科研費15H02863の支援により行われました。

文 献

- 1) 柴田直明：長野県における木製遮音壁の開発と施工—1985年度試験施工200 mと2012年度新設48 m—, 木材保存 39(5), 256-260 (2013).
- 2) 町田初男：群馬県における木製遮音壁の設置及び維持管理の取り組み, 木材工業 62(12), 637-639 (2007).
- 3) 外崎真理雄：木材利用実績および土木における利用ポテンシャル, 2009年度土木における木材の利用拡大に関する横断的研究報告書, 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会, 東京, 2010, pp. 73-74.
- 4) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate change 2014, Fifth Assessment Report, Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, New York, 2014.
- 5) Kayo, C., Hashimoto, S., Numata, A., Hamada, M.: Reductions in greenhouse gas emissions by using wood to protect against soil liquefaction. *J. Wood Sci.* 57(3), 234-240 (2011).
- 6) Noda, R., Kayo, C., Sasaki, T., Takaoku, S.: Evaluation of CO₂ emissions reductions by timber check dams and their economic effectiveness. *J. Wood Sci.* 60(6), 461-472 (2014).
- 7) Noda, R., Kayo, C., Yamanouchi, M., Shibata, N.: Life cycle greenhouse gas emission of wooden guardrails: a study in Nagano Prefecture. *J. Wood Sci.* 62(2), 181-193 (2016).
- 8) 長野県産材販路開拓協議会：製品版のご案内, <http://naganowood.com/syaonheki/products/> 2016年4月12日参照.
- 9) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社：設計要領第五集 交通管理施設編 遮音壁設計要領, 2015, pp. 7-8, 16.
- 10) ISO/TS 14067: Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication. The International Organization for Standardization, Geneva, 2013, p. 52.
- 11) IPCC (2014) Climate Change 2014, Fifth Assessment Report, Mitigation of Climate Change
- 12) 山内仁人, 柴田直明, 丸山 浩, 宮崎正毅, 藤本隆史：設置後約30年経過したカラマツ製遮音壁の音響性能, 第66回日本木材学会大会, 名古屋, 2016 (CD-ROM).
- 13) 中日本高速道路株式会社：高速道路ネットワークの長期保全計画に関する検討会(第3回), 2009.
- 14) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社：設計要領第五集 交通管理施設編 遮音壁設計要領, 2015, pp. 52-53.
- 15) 産業環境管理協会：MiLCA (IDEA Ver. 1.1.0), 産業環境管理協会, 東京, 2014.
- 16) NPO法人才の木：木材の環境貢献度表示に係る技術支援報告書, 14-17, (2013).
- 17) 全国木材検査・研究協会：新しい製材の日本農林規格並びに改正の要点及び解説, 一般社団法人全国木材検査・研究協会, 東京, 2009, pp. 193-195.
- 18) 環境省：温室効果ガス排出量算定に関する検討結果 第5部 森林等の吸収源分科会報告書, 環境省, 東京, 2006, p. 10.

- 19) “平成27年度版 工事歩掛要覧 土木編上”, 経済調査会, 東京, 2015.
- 20) 全国木材資源リサイクル協会連合会木質リサイクルチップの品質規格について. 全国木材資源リサイクル協会連合会, 東京, 2010.
- 21) 森のエネルギー研究所: 木質バイオマスボイラー導入指針. 森のエネルギー研究所, 東京, 2012.
- 22) 戒能一成: エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数の改訂案について, 2013年度改訂標準発熱量・炭素排出係数表. 経済産業研究所, 東京, 2014.
- 23) Abe, F.: Calorific value of Japanese coniferous wood. *Bull. For. & For. Prod. Res. Inst.* **338**, 91-100 (1986).
- 24) 環境省: 産業廃棄物の排出及び処理状況等(平成24年度実績). 環境省, 東京, 2014.
- 25) 国土交通省: 平成24年度建設副産物実態調査結果. 国土交通省, 東京, 2014.
- 26) 普通鋼電炉工業会: 普通鋼電炉鋼材, http://www.fudenkou.jp/about_02.htm 2016年6月9日参照.
- 27) 日本建設業協会連合会: 再生骨材コンクリートの普及促進に向けて, <http://www.nikkenren.com/publication/pdf/182/saiseikotsuzaikonkuri-tonohukyuusokushin-nimukete2.pdf> 2016年6月9日参照.
- 28) 日本鉄鋼連盟: 鉄鋼製品のリサイクル特性を反映したLCI計算手法, http://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/150804_3.pdf 2016年7月16日参照.
- 29) 高橋泰一, 阿部道彦: 再生骨材のコンクリートへの適用の現状と将来. *コンクリート工学* **33**(2), 20-28 (1995).
- 30) 町田初男, 小黒正次, 工藤康夫, 長尾博文, 加藤英雄, 井道裕史: 木製遮音壁の経年劣化と劣化外力の影響. *木材保存* **36**(2), 59-64 (2010).