木質バイオマス地域熱供給システムの温室効果ガス排出削減効果 岩手県紫波町を対象として*1

加用千裕*2, 大慈彌亮太*3, 岩岡正博*2, 安田幸治*4

Greenhouse Gas Emission Reductions in a District Heating and Cooling System by Using Woody Biomass A study in Shiwa, Iwate Prefecture*1

Chihiro KAYO*2, Ryota OJIMI*3,
Masahiro IWAOKA*2 and Koji YASUDA*4

A life cycle assessment of greenhouse gas (GHG: CO₂, CH₄, N₂O) emissions for a district heating and cooling (DHC) system using woody biomass was conducted, and reductions in emissions from substitution of fossil fuels with woody biomass were analyzed in Shiwa, Iwate Prefecture. From the process of log production to heating, the life cycle GHG emissions of the DHC system were 70.8 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat. Of these emissions, the majority (92%) originated from the heating process. Substitution of liquefied petroleum gas (LPG) with wood chips resulted in a reduction of GHG emissions of 92.4 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat. With this substitution taken into account, the net GHG emissions of the DHC system were -21.6 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat, which indicated that the DHC system had the potential to reduce GHG emissions. The GHG emission reductions generated by the DHC system would not be obtained if the heat usage efficiency were reduced from the current 29% to less than 23%. Conversely, if the heat usage efficiency were improved to 75%, reductions in GHG emissions corresponding three times the current levels could be obtained. The GHG emission reductions could also increase if kerosene or heavy oil were used as a substitute for the currently used LPG. However, compared to the significant impact of heat usage efficiency, the substitution of fossil fuels had a relatively minor effect on the reduction of GHG emissions.

Keywords : woody biomass, DHC system, LCA, greenhouse gas, fossil fuel substitution.

岩手県紫波町における木質バイオマス地域熱供給システムのライフサイクル温室効果ガス (GHG : CO₂, CH₄, N₂O) 排出量および化石燃料代替に伴う GHG 排出削減量を評価した。丸太生産過程から熱供給過程までのライフサイクル GHG 排出量は 70.8 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat となり、熱供給過程からの排出量が全体の 92% を占めた。一方、被代替過程における液化石油ガス (LPG) 代替によって 92.4 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat の GHG 排出削減量が得られ、これを考慮した正味の GHG

*1 Received February 19, 2016; accepted March 18, 2016.

*2 東京農工大学大学院農学研究 院 Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183-8509, Japan

*3 東京農工大学農学部 Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183-8509, Japan

*4 林野庁林政部 Forest Policy Planning Department, Forestry Agency, Tokyo 100-8952, Japan

Corresponding author: C. Kayo (kayoc@cc.tuat.ac.jp)

排出量は $-21.6 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、化石燃料代替に伴う GHG 排出削減効果が期待できることが分かった。また、現状の熱利用効率29%が23%まで低下すると GHG 排出削減効果は得られなくなるが、75%まで改善することができれば現状の3倍の GHG 排出削減効果が得られる可能性がある。

1. 緒 言

木材は炭素貯蔵効果、材料代替効果、エネルギー代替効果を通して地球温暖化の緩和に貢献すると認識されている¹⁾。特に、エネルギー代替効果は木質バイオマスをエネルギー利用することにより、温室効果ガス (GHG) の主な発生源である化石燃料を直接的に代替し、化石燃料消費由来の GHG 排出量を削減するものであり、国内外において関心が高まっている。木質バイオマスのエネルギー利用形態は複数あり、電力、熱供給、自動車燃料が代表例として挙げられる。2012年7月から開始された再生可能エネルギー固定価格買取制度では、木質バイオマスによる発電が対象とされているが、熱供給や自動車燃料は対象外となっている²⁾。しかし、発電によるエネルギー利用効率が20%前後であるのに対し、熱供給によるエネルギー利用効率は75%程度が見込まれるとする報告³⁾もあり、十分な熱需要がある地域では熱供給が有望なエネルギー利用形態になり得ると考えられる。

特に近年、木質バイオマスによる地域熱供給 (DHC: district heating and cooling) システムが注目されている。地域熱供給システムとは、1カ所または数カ所の熱供給施設から複数の建物・施設に配管を通して、温水、冷水、蒸気を送り、給湯、暖房、冷房等を行うものである。スウェーデンやオーストリアを中心に欧州諸国で普及が進んでいるが、日本においても北海道下川町、岩手県紫波町、山形県小国町、山形県最上町、滋賀県高島市、山口県下関市等の先進事例⁴⁾がある。地域内で生産される木質バイオマスをエネルギー源とする地域熱供給ができれば、その地域でのエネルギー自給率が高まり、さらに GHG 排出削減効果も期待できる。

木質バイオマスのエネルギー利用による GHG 排出削減効果を定量的に評価する方法の1つにライフサイクルアセスメント (LCA) がある。LCA とは、対象とする製品やサービスを生み出す資源の採取から製品の使用・廃棄段階まで、ライフサイクル全体を通して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評価する手法である。LCA 手法を用いて木質バイオマスエネルギーの GHG 排出量や排出削減効果を検討した先行研究としては、発電

を対象とした研究⁵⁾、木質ペレットを対象とした研究^{6, 7)}、自動車燃料を対象とした研究^{8, 9)}、電熱併給を対象とした研究¹⁰⁾、複数のエネルギー利用形態を比較評価した研究¹¹⁻¹⁴⁾等が報告されている。しかし、日本国内において複数の建物・施設へ給湯、暖房、冷房等を供給する木質バイオマス地域熱供給システムを対象とした LCA に関する先行研究はこれまで報告されておらず、ライフサイクルを通じた GHG 排出量や化石燃料との代替による GHG 排出削減効果はまだ明らかになっていない。

そこで、本研究では、日本における先進事例の1つである岩手県紫波町の木質バイオマス地域熱供給システムを対象に、LCA 手法によってライフサイクル GHG 排出量を評価し、さらに、化石燃料との代替に伴う GHG 排出削減効果を明らかにすることを目的とする。

2. 方 法

2.1 対象とした地域および熱供給システムの概要

対象地域である紫波町は岩手県のほぼ中央、盛岡市と花巻市の間に位置し、北上川が中央を流れ、東は北上高地、西は奥羽山脈までの総面積238.98 km² (このうち57.8%が森林)、人口33696人 (2015年3月31日現在)¹⁵⁾の町である。紫波町内の JR 東北本線紫波中央駅前にオガール地区と呼ばれる町有地10.7 ha があり、その概要を Fig. 1 に示した。オガール地区は町役場庁舎、一般住宅 (オガールタウン)、ビジネスホテル・体育館・飲食店を中心とする商業施設 (オガールベース)、図書館・産直市場

Fig. 1. Overview of the Ogar area.¹⁵⁾

を中心とする公共・商業複合施設(オガールプラザ)、スポーツ施設、公園、木質バイオマスによる熱供給施設(エネルギーステーション)等で構成されている。熱供給施設では、紫波町内産の木材を燃料とする木質チップボイラーを熱源として、町役場庁舎、一般住宅、商業施設に給湯・暖房・冷房用の熱を供給している。燃料の木質チップの生産・運搬はA社が行い、熱供給施設の管理・運営はB社が行っている。この地域熱供給事業は2014年7月から開始されている。

2.2 評価対象範囲

評価対象とした木質バイオマス熱供給システムのライフサイクル(システム境界)は丸太生産、丸太輸送、チップ生産、チップ輸送、熱供給の各過程とし、Fig.2 および Fig.3 に示した。焼却灰は周辺農家において土壌改良材として再利用されているため、焼却灰処理過程は検討しなかった。また、本研究対象の熱供給施設には、補助・非常用の液化石油ガス(LPG)ボイラーが設置されており、木質チップボイラーと同地区・同規模への熱供給が可能である。そこで、木質チップボイラーによる熱供給によってLPGボイラーを代替することを想定し、被代替過程として資源採取、資源輸送、LPG生産、LPG輸送、LPG燃焼を対象とした。なお、熱供給システムに使用される設備や機器の製造・輸送・補修・廃棄等の各過程は評価対象に含めなかった。

Fig. 2. Life cycle process (system boundary) of the district heating and cooling (DHC) system by using woody biomass.

Fig. 3. Main steps from the log production process to the heating process.¹⁶⁾

2.3 ライフサイクル GHG 排出量・削減量の評価

ライフサイクル GHG 排出量・削減量の評価において、機能単位は熱供給量 1 GJ 当たりの排出量・削減量 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$) とした。フォアグラウンドデータとして収集した材料・燃料の消費量・代替量を Table 1 に示した。丸太生産過程は岩岡・一二三の先行研究¹⁹⁾を参照し、丸太輸送、チップ生産、チップ輸送過程は A 社への聞き取り調査を行い、熱供給過程は B 社への聞き取り調査を実施し、各種データを収集した。バックグラウンドデータとして用いた GHG 排出量原単位は MiLCA データベース²¹⁾ から引用し、Table 2 に示した。ここで、GHG 排出は化石燃料消費由来の CO_2 、 CH_4 、 N_2O を評価対象とした。木質チップ由来の CO_2 排出は木材伐採後の植栽による次世代更新を前提とし、カーボンニュートラルの考え方を適用して評価対象外としたが、木質チップ由来の CH_4 と N_2O の排出は ISO の規定²²⁾ 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 (GWP_{100}) ($\text{CO}_2: 1$, $\text{CH}_4: 34$, $\text{N}_2\text{O}: 298$)²³⁾ を用いて CO_2 換算 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}$) で示した。次項以降はライフサイクル過程ごとに評価方法を詳述する。

2.3.1 丸太生産過程

原料の丸太は紫波町内で伐採された間伐材(スギ)および松食虫被害木(アカマツ)である。間伐材の搬出・受入等の業務を担う A 社への聞き取り調査により、丸太生産方法は短幹集材による間伐であり、伐木・造材工程はチェーンソーを使用し、集材工程は林内作業車を使用していることが確認された。そのため、これらの工程におけるチェーンソーの燃料(ガソリン・潤滑油)および林内作業車の燃料(軽油)の消費を対象とし、熱供給量当たりの丸太生産量 ($\text{m}^3/\text{GJ-heat}$) (Table 1) に各燃料消費量 (L/m^3) (Table 1) および各燃料消費に伴う GHG 排出量原単位 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{L}$) (Table 2) を乗じることにより、丸太生産過程の GHG 排出量 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{GJ-heat}$) を算定した。なお、各燃料消費量は岩岡・一二三の先行研究¹⁹⁾において実施した木材生産作業に関わる全国規模のアンケート調査の結果から、本研究対象の丸太生産と同様のチェーンソーおよび林内作業車の数値を引用した。

2.3.2 丸太輸送過程

熱供給量当たりの丸太生産量 ($\text{m}^3/\text{GJ-heat}$) (Table 1) に丸太の容積密度 (t/m^3) (Table 1)、丸太生産現場からチップ生産現場までの輸送距離 (km) (Table 1)、2 トントラックの輸送による GHG 排出量原単位 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/(\text{t}\cdot\text{km})$) (Table 2)

Table 1. Material and energy used and substituted for each process.

	Life cycle process	Unit	Value	Note
Log production process	Log production volume*	m ³ -log/GJ-heat	0.3	Chip production volume from logs: 3 m ³ -chip/m ³ -log*
	Moisture content of logs ¹⁷⁾	%	50	Wet basis
	Density of logs ^{17, 18)}	t/m ³	0.7	The weighted average of Japanese cedar is 70% and Japanese red pine is 30%
	Gasoline consumption by chain saw ¹⁹⁾	L/m ³ -log	1.00	For felling, limbing and bucking
	Lubricant consumption by chain saw ¹⁹⁾	L/m ³ -log	0.60	For felling, limbing and bucking
	Light oil consumption by forest tractor ¹⁹⁾	L/m ³ -log	1.00	For yarding
Log transport process	Transport distance of logs*	km	10	From the log production site to the chip production site, 2 ton truck*
Chip production process	Chip production volume*	m ³ -chip/GJ-heat	1.0	Chip production volume from logs: 3 m ³ -chip/m ³ -log*
	Moisture content of chips**	%	30	Wet basis
	Density of chips**	t/m ³	0.25	
	Light oil consumption by chipper*	L/m ³ -chip	0.5	
Chip transport process	Transport distance of chips*	km	7	From the chip production site to the heat supply site, 1.5 ton truck*
Heating process	Chip consumption***	m ³ /GJ-heat	1.0	Net calorific value: 13.1 (GJ/t)**; heat usage efficiency: 29% (0.29)***
	Kerosene consumption***	L/GJ-heat	1.7	Net calorific value: 0.034 (GJ/L) ²⁰⁾
	LPG consumption***	m ³ /GJ-heat	1.5	Net calorific value: 0.091 (GJ/m ³) ²⁰⁾
	Electricity consumption***	kWh/GJ-heat	80.1	
	Industrial water consumption***	m ³ /GJ-heat	0.2	
Ash treatment process	Incinerated ash generation**	m ³ /GJ-heat	0.02	2% of chip consumption**
Substituted process	LPG substitution with chips	m ³ /GJ-heat	12.6	Net calorific value: 0.091 (GJ/m ³) ²⁰⁾ ; heat usage efficiency: 84% (0.84)***

* An interview survey with A corporation

** An interview survey with B corporation

*** Numeric data obtained from B corporation

Table 2. Greenhouse gas (GHG) emission intensities.²¹⁾

	Unit	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	GHG total	Scope of assessment
Chip combustion	kg-CO _{2-eq} /m ³	—	0.003	0.000	0.003	Chip combustion (for CH ₄ and N ₂ O, and not for CO ₂)
Transport by 2 ton truck	kg-CO _{2-eq} /t-km	0.219	0.008	0.001	0.228	Resource extraction ~ light oil production ~ light oil combustion
Transport by 1.5 ton truck	kg-CO _{2-eq} /t-km	0.226	0.009	0.001	0.236	Resource extraction ~ light oil production ~ light oil combustion
Gasoline consumption	kg-CO _{2-eq} /L	2.720	0.106	0.014	2.839	Resource extraction ~ gasoline production ~ gasoline combustion
Lubricant consumption	kg-CO _{2-eq} /L	3.510	0.132	0.023	3.665	Resource extraction ~ lubricant production ~ lubricant combustion
Light oil consumption	kg-CO _{2-eq} /L	2.821	0.107	0.014	2.942	Resource extraction ~ light oil production ~ light oil combustion
Kerosene consumption	kg-CO _{2-eq} /L	2.672	0.103	0.013	2.788	Resource extraction ~ kerosene production ~ kerosene combustion
LPG consumption	kg-CO _{2-eq} /m ³	7.017	0.291	0.038	7.346	Resource extraction ~ LPG production ~ LPG combustion
Heavy oil consumption	kg-CO _{2-eq} /L	2.989	0.114	0.015	3.118	Resource extraction ~ heavy oil production ~ heavy oil combustion
Electricity consumption	kg-CO _{2-eq} /kWh	0.583	0.006	0.019	0.609	Resource extraction ~ electricity generation (Tohoku Electric Power Co., Inc.)
Industrial water consumption	kg-CO _{2-eq} /m ³	0.129	0.002	0.003	0.134	Resource extraction ~ industrial water supply

および2（トラック往復分）を乗じて、丸太輸送過程のGHG排出量(kg-CO_{2-eq}/GJ-heat)を算出した。なお、丸太の容積密度は湿量基準（乾量基準）の含

水率50%（100%）¹⁷⁾ および全乾密度0.36 t/m³を用いて求めた。ここで、全乾密度は、チップの樹種比率がスギ70%、アカマツ30%であることから、これら

の全乾密度¹⁸⁾を加重平均して求めた。

2.3.3 チップ生産過程

丸太乾燥工程およびチップ生産工程を対象とした。ただし、A社への聞き取り調査により、丸太乾燥工程では天然乾燥を行っていることが確認されたため、本工程の燃料消費およびGHG排出はゼロと想定した。チップ生産工程は熱供給量当たりのチップ生産量 ($\text{m}^3/\text{GJ-heat}$) (Table 1) にチップの燃料 (軽油) 消費量 (L/m^3) (Table 1), 軽油消費に伴うGHG排出量原単位 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{L}$) (Table 2) を乗じることにより、GHG排出量 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{GJ-heat}$) を計算した。

2.3.4 チップ輸送過程

熱供給量当たりのチップ生産量 ($\text{m}^3/\text{GJ-heat}$) (Table 1) にチップの容積密度 (t/m^3) (Table 1), チップ生産現場から熱供給施設までの輸送距離 (km) (Table 1), 1.5トントラックの輸送によるGHG排出量原単位 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/(\text{t}\cdot\text{km})$) (Table 2) および2 (トラック往復分) を乗じることにより、チップ輸送過程のGHG排出量 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{GJ-heat}$) を求めた。

2.3.5 熱供給過程

熱供給システムにおける主要機器は木質チップボイラー、吸収式冷凍機、温水蓄熱タンク、冷水蓄熱タンク、冷水チラー、LPGボイラーである。木質チップボイラーでは、炉内に木質チップを取り入れて燃焼させ、燃焼ガスと水を熱交換し、約80℃の温水を作り出す。温水の一部は温水蓄熱タンクに送られ、各建物・施設へ給湯・暖房用に送水される。もう一部は吸収式冷凍機により約7℃の冷水となり、冷水蓄熱タンクから各建物・施設へ冷房用に送水される。また、冷水チラーは冷水蓄熱タンクの補助、LPGボイラーは木質チップボイラーの補助および

非常時対応のために使用されている。

2014年9月～2015年8月の1年間におけるエネルギー収支の数値データをB社から得て、Table 3に示した。なお、この数値データにおいて、エネルギー産出量は各建物・施設への熱供給量実測値から、エネルギー投入量は各燃料の購入伝票から算出されたものである。熱供給の直接的なエネルギー投入は木質チップとLPGである。なお、木質チップボイラーの着火のために灯油が使用され、冷水チラーの運転、各建物・施設への送水、熱供給システム制御等のために電力が使われているが、熱源としては用いられていない。エネルギー産出はオガール地区内の町役場庁舎、一般住宅、商業施設への給湯・暖房・冷房熱である。エネルギー産出量 (Table 3におけるOutputのTown office, Residential area, Commercial facilityの合計値) をエネルギー投入量 (Table 3におけるInputのChipsとLPGの合計値) で除した熱利用効率率は29%となった。2015年6月から町役場庁舎への熱供給が本格的に開始されたことや、2015年10月現在において一般住宅への熱供給が3戸に留まっていること等から、まだ安定的な熱需要が確保されておらず、熱損失が大きくなったと考えられる。

熱供給過程におけるGHG排出量 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{GJ-heat}$) は熱供給量当たりのチップ消費量 ($\text{m}^3/\text{GJ-heat}$) (Table 1) にチップの燃焼に伴うGHG排出量原単位 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$) (Table 2) を乗じ、また、LPG ($\text{m}^3/\text{GJ-heat}$)・灯油 ($\text{L}/\text{GJ-heat}$)・電力 ($\text{kWh}/\text{GJ-heat}$)・工業用水 ($\text{m}^3/\text{GJ-heat}$) の消費量 (Table 1) にそれらの消費に伴うGHG排出量原単位 (LPG: $\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$, 灯油: $\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{L}$, 電力: $\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{kWh}$, 工業用水: $\text{kg-CO}_2\text{-eq}/\text{m}^3$) (Table 2) を各々乗じ、それらを合計することによって求めた。

Table 3. Annual energy balance of the heating process.

		Unit		Value	
Output (heat)	Town office	GJ		258.54	
	Residential area	GJ		30.939	
	Commercial facility	GJ		1275.7	
Input	Chips (heat source)	GJ*	m^3	5.3×10^3	1603.32
	LPG (heat source)	GJ**	m^3	2.2×10^2	2382.2
	Kerosene	L		2593	
	Electricity	kWh		125375	

* The value was calculated by multiplying input value of chips (m^3) by density of chips ($0.25 \text{ t}/\text{m}^3$) (Table 1), and by net calorific value of chips ($13.1 \text{ GJ}/\text{t}$) (30% moisture content) (Table 1).

** The value was calculated by multiplying input value of LPG (m^3) by net calorific value of LPG ($0.091 \text{ GJ}/\text{m}^3$) (Table 1).

なお、チップの燃焼に伴う GHG 排出量原単位は、2.3 において記述したとおり、ISO の規定²²⁾ に従い、CH₄と N₂O は含み、CO₂は含まないこととした。

2.3.6 被代替過程

木質チップの化石燃料代替に伴う GHG 排出削減量を検討した。2.2において述べたとおり、LPG を被代替対象の化石燃料とした。熱供給量当たりの木質チップ消費量を式 (1) により求め、低位発熱量換算での木質チップによる LPG 代替量を式 (2) により求めた。

$$WC = \frac{AWC}{AHS} \quad (1)$$

$$SL = \frac{WC \times DW \times CW \times EW}{CL \times EL} \quad (2)$$

ここで、WC (m³/GJ-heat) は熱供給量当たりのチップ消費量、AWC (m³) は熱供給システムにおける 1 年間の木質チップ消費量、AHS (GJ-heat) は熱供給システムにおける 1 年間の熱供給量を示し、Table 3 を用いて算定した。その結果、熱供給量当たりのチップ消費量 (WC) は 1.0 m³/GJ-heat となった。SL (m³/GJ-heat) は熱供給量当たりの LPG 代替量、DW (t/m³) はチップの容積密度 (湿量基準の含水率30%)、CW (GJ-chip/t) はチップの低位発熱量、EW はチップの熱利用効率、CL (GJ-lpg/m³) は LPG の低位発熱量、EL は LPG の熱利用効率を示し、各数値は Table 1 に示した。なお、チップの低位発熱量 (CW) は、スギの高位発熱量 (全乾時) 20.9 GJ/t (4985 cal/g)²⁴⁾ およびアカマツの高位発熱量 (全乾時) 21.7 GJ/t (5175 cal/g)²⁴⁾ をチップの樹種比率 (スギ70%・アカマツ30%) で加重平均し 21.1 GJ/t を求め、さらに、湿量基準 (乾量基準)

の含水率30% (43%)、水素含有率 (全乾時) 6 %²⁴⁾ を用いて、低位発熱量計算式²⁵⁾ により 13.1 GJ/t を得た。これらの算定の結果、熱供給量当たりの LPG 代替量 (SL) は 12.6 m³/GJ-heat となった。

この熱供給量当たりの LPG 代替量 (m³/GJ-heat) に LPG 消費に伴う GHG 排出量原単位 (kg-CO_{2-eq}/m³) (Table 2) を乗じることにより、LPG 代替に伴う GHG 排出削減量として 92.4 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat を算出した。

3. 結 果

木質バイオマス地域熱供給システムのライフサイクル GHG 排出量・削減量の評価結果を Table 4 に示した。丸太生産過程から熱供給過程までの GHG 排出量は 70.8 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat となった。各 GHG の排出割合は CO₂由来が 96% で大部分を占め、CH₄由来は 2%、N₂O 由来は 2% であった。各ライフサイクル過程の排出割合を Fig. 4 に示した。熱供給過程からの排出量が全体の 92% を占め、特に電力由来の排出量が 69% で最も大きく、LPG 由来が 16%、灯油由来が 7% と続き、チップおよび工業用水由来はともに 1% 未満であった。また、丸太生産過程からの排出量は全体の 3%、丸太輸送過程およびチップ生産過程はともに 2%、チップ輸送過程は 1% となった。一方、被代替過程による LPG 代替に伴う GHG 排出削減量は 92.4 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat であり、これを考慮した正味の GHG 排出量は -21.6 kg-CO_{2-eq}/GJ-heat となり、化石燃料代替に伴う削減効果があることが分かった。

Table 4. Evaluation result for life cycle greenhouse gas (GHG) emissions and reductions (+ : emissions, - : reductions).

		Unit : kg-CO _{2-eq} /GJ-heat
Life cycle process		Value
Log production process	Gasoline consumption	1.0
	Lubricant consumption	0.8
	Light oil consumption	1.0
Log transport process	Light oil consumption	1.1
Chip production process	Light oil consumption	1.5
Chip transport process	Light oil consumption	0.8
Heating process	Chip consumption	0.003
	LPG consumption	11.2
	Kerosene consumption	4.6
	Electricity consumption	48.8
	Industrial water consumption	0.03
Substituted process	LPG substitution	-92.4
Total	Emissions (log production to heating)	70.8
	Net emissions (log production to substituted)	-21.6

Fig. 4. Breakdown of greenhouse gas (GHG) emissions (from the log production process to the heating process).

4. 考 察

4.1 先行研究との比較

本研究結果と先行研究との比較を行った。1.において述べたとおり、日本における木質バイオマスの地域熱供給を対象とした先行研究はこれまで報告されていないため、木材乾燥熱、発電、木質ペレットを対象とした先行研究^{5, 11)}との比較を行うこととした。ただし、本研究と先行研究では、木質バイオマスの種類、システム境界、GHG 排出量原単位、地球温暖化係数等が全て統一されているわけではないことに留意する必要がある。古俣ら⁵⁾は林地残材の発電利用におけるライフサイクル GHG 排出量を評価している。林地残材の種類、ボイラー形式、発電効率の違いにより、受電端電力量当たりの GHG 排出量は $0.10 \sim 1.27 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/kWh}$ の範囲で幅が生じると報告している。本研究の結果における熱供給量の単位を GJ から kWh ($1 \text{ kWh} = 0.0036 \text{ GJ}$) に換算すると、丸太生産過程から熱供給過程までの GHG 排出量は $0.25 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/kWh-heat}$ となり、発電よりも GHG 排出量が小さくなる場合もあれば大きくなる場合もあることが分かった。海外の先行研究^{3, 14)}では、熱供給は発電よりもライフサイクル GHG 排出量が大幅に小さいことが報告されており、熱供給の GHG 排出量は発電の 30% 程度³⁾とされている。一方、本研究対象の地域熱供給は発電と比較して GHG 排出量が大幅に小さいという状況には至っていないと考えられる。また、一重・服部¹¹⁾は製材残材による製材乾燥熱、発電、ペレット利用を対象としたライフサイクル GHG 排出量および化石燃料代替による GHG 排出削減量を検討している。製材残材利用量当たりの正味（被代替過程を含む）

の GHG 排出量は製材乾燥熱で $-380 \sim -280 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/m}^3$ 、発電で $-79 \sim 28 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/m}^3$ 、ペレットで $-302 \sim -13 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/m}^3$ の範囲となることを報告している。本研究の結果における熱供給量をチップ消費量 ($1.0 \text{ m}^3/\text{GJ-heat}$) (Table 1) に換算すると、チップ消費量当たりの正味（被代替過程を含む）の GHG 排出量は $-21 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/m}^3$ となった。これらの結果から、本研究対象の地域熱供給は製材乾燥熱よりも GHG 排出削減効果が小さくなる可能性が高いが、発電やペレットとは削減効果が競合する状況にあると考えられる。

4.2 感度分析

本研究では、主に聞き取り調査によって評価に用いたデータ (Table 1) を収集したため、3.において示した結果 (Table 4) にはデータの不確実性が含まれている。そこで、不確実性が大きいと考えられる項目について感度分析を行い、結果への影響を考察することとした。丸太からのチップ生産量、チップの容積密度、チップの高位発熱量、丸太の含水率、チップの含水率を分析対象とした。丸太からのチップ生産量については、A 社への聞き取り調査で得られたチップ生産量の変動状況を踏まえて、Table 1 において仮定した値である $3 \text{ m}^3\text{-chip/m}^3\text{-log}$ が $2.8 \sim 3.2 \text{ m}^3\text{-chip/m}^3\text{-log}$ の範囲で変動することを想定した。チップの容積密度については、Table 1 において仮定した 0.25 t/m^3 が $0.2 \sim 0.3 \text{ t/m}^3$ の範囲で変動することを検討した。チップの高位発熱量は、B 社への聞き取り調査を踏まえ、スギとアカマツの樹種比率が $\pm 20\%$ 変化することにより、Table 1 において仮定した 21.1 GJ/t (全乾時) が $20.9 \sim 21.3 \text{ GJ/t}$ の範囲で変動すると想定した。丸太の含水率は、Table 1 における 50% (湿量基準) が $40 \sim 60\%$ の範囲で変動するとした。チップの含水率については、B 社への聞き取り調査により、Table 1 における 30% (湿量基準) が $14 \sim 44\%$ の範囲で変動することを検討した。

感度分析の結果を Table 5 に示した。丸太からのチップ生産量において、正味の GHG 排出量は $-21.3 \sim -22.0 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、3.において示した正味の GHG 排出量の 98~102% に相当した。チップの容積密度では、正味の GHG 排出量は $-20.3 \sim -22.5 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、3.において示した正味の GHG 排出量の 94~104% の範囲であった。チップの高位発熱量については、正味の GHG 排出量は $-21.6 \sim -21.7 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、3.における結果からはほぼ変化しなかった。丸太の含水率およびチップの含水率においては、正味

の GHG 排出量は $-21.4 \sim -21.8 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ および $-20.5 \sim -22.4 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、3.における結果の99~101% および95~104% の範囲であった。これらの結果から、数値の不確実性を考慮しても正味の GHG 排出量に大きな影響はなく、GHG 排出削減効果は得られると考えられる。

4.3 さらに GHG 排出削減の可能性

3.で示した結果 (Table 4) において、熱供給過程および被代替過程における GHG 排出量・削減量がライフサイクル全体の大部分を占めていたことから、これらの過程における熱利用効率および代替する化石燃料の種類に着目し、さらなる GHG 排出削減の可能性を検討した。熱利用効率については、現

状の29%が変化(エネルギー投入量に対するエネルギー産出量が増減)することを検討した。熱利用効率の変化に対する正味の GHG 排出量の分析結果を Fig. 5に示した。熱利用効率を75%まで改善することができると、正味の GHG 排出量は $-65.3 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、現状の3倍に GHG 排出削減効果が大きくなった。一方、熱利用効率が23%を下回ると、正味の GHG 排出量は正の値となり削減効果はなくなることが分かった。代替する化石燃料の種類については、現状の LPG に対して灯油および重油を想定した。式 (1)・(2)と同様の方法により熱供給量当たりの灯油および重油代替量 (L/GJ-heat) を求め、灯油および重油の消費に伴う GHG

Table 5. Results of sensitivity analysis (+ : emissions, - : reductions).

Life cycle process		Unit: $\text{kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$					
		Chip production volume from logs		Density of chips		Gross calorific value of chips	
		$2.8 \text{ m}^3/\text{m}^3$	$3.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$	0.2 t/m^3	0.3 t/m^3	20.9 GJ/t	21.3 GJ/t
Log production process	Gasoline consumption	1.0	0.9	1.2	0.8	1.0	1.0
	Lubricant consumption	0.8	0.7	0.9	0.6	0.8	0.8
	Light oil consumption	1.1	0.9	1.3	0.8	1.0	1.0
Log transport process	Light oil consumption	1.2	1.0	1.4	0.9	1.1	1.1
Chip production process	Light oil consumption	1.6	1.4	1.9	1.3	1.5	1.5
Chip transport process	Light oil consumption	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Heating process	Chip consumption	0.003	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003
	LPG consumption	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
	Kerosene consumption	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
	Electricity consumption	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8	48.8
	Industrial water consumption	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Substituted process	LPG substitution	-92.4	-92.4	-92.4	-92.4	-92.4	-92.4
Total	Emissions (log production to heating)	71.2	70.4	72.1	69.9	70.8	70.8
	Net emissions (log production to substituted)	-21.3	-22.0	-20.3	-22.5	-21.6	-21.7

Table 5. (continued) Results of sensitivity analysis (+ : emissions, - : reductions).

Life cycle process		Unit: $\text{kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$			
		Moisture content of logs		Moisture content of chips	
		40%	60%	14%	44%
Log production process	Gasoline consumption	1.0	1.0	1.0	1.0
	Lubricant consumption	0.8	0.8	0.8	0.8
	Light oil consumption	1.0	1.0	1.0	1.0
Log transport process	Light oil consumption	0.9	1.4	1.1	1.1
Chip production process	Light oil consumption	1.5	1.5	1.5	1.5
Chip transport process	Light oil consumption	0.8	0.8	0.8	0.8
Heating process	Chip consumption	0.003	0.003	0.003	0.003
	LPG consumption	11.2	11.2	11.2	11.2
	Kerosene consumption	4.6	4.6	4.6	4.6
	Electricity consumption	48.8	48.8	48.8	48.8
	Industrial water consumption	0.03	0.03	0.03	0.03
Substituted process	LPG substitution	-92.4	-92.4	-93.2	-91.3
Total	Emissions (log production to heating)	70.6	71.0	70.8	70.8
	Net emissions (log production to substituted)	-21.8	-21.4	-22.4	-20.5

排出量原単位 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq/L}$) (Table 2) を各々乗じ、灯油および重油代替に伴う GHG 排出削減量 ($\text{kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$) を算定した。なお、式 (2) における灯油および重油の低位発熱量 (GJ-kerosene/L , GJ-heavy oil/L) は $0.034^{20)}$ および $0.037^{20)}$ を引用し、熱利用効率は LPG と同値の 84% (Table 1) を用いることとした。各化石燃料の被代替過程における GHG 排出削減量および正味の GHG 排出量の分析結果を Fig. 6 に示した。灯油あるいは重油との代替を想定すると、現状の LPG よりも化石燃料代替に伴う GHG 排出削減量は大きくなることが分かった。正味の GHG 排出量において、灯油では $-23.1 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ 、重油では $-25.7 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ の削減効果が期待できる結果となった。ただし、上述の熱利用効率と比較して結果へ与える影響は小さかった。

5. 結 論

本研究では、木質バイオマス地域熱供給システム

Fig. 5. Heat usage efficiency and net greenhouse gas (GHG) emissions of the district heating and cooling (DHC) system.

Fig. 6. The substituted fossil fuels and net greenhouse gas (GHG) emissions of the district heating and cooling (DHC) system.

の先進事例地域である岩手県紫波町を対象に、ライフサイクル GHG 排出量・削減量を評価した。得られた主な知見は以下のとおりである。

1. 丸太生産過程から熱供給過程までのライフサイクル GHG 排出量は $70.8 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、熱供給過程からの排出量が全体の約 92% を占め、特に電力由来の排出量が多い。一方、被代替過程において $92.4 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ の GHG 排出削減量が得られ、これを考慮した正味の GHG 排出量は $-21.6 \text{ kg-CO}_2\text{-eq/GJ-heat}$ となり、化石燃料代替に伴う GHG 排出削減効果が期待できる。
2. 複数のエネルギー利用形態を対象とした先行研究と比較した結果、本研究対象の地域熱供給におけるライフサイクル GHG 排出量・削減量は木材乾燥熱、発電、木質ペレットと比べて優位とはいえない。
3. 感度分析の結果、丸太からのチップ生産量、チップの容積密度、チップの高位発熱量、丸太の含水率、チップの含水率におけるデータの不確実性を考慮しても、評価結果への影響は小さく、GHG 排出削減効果は得られる。
4. 熱利用効率が 23% を下回ると正味の GHG 排出量が正の値となり、GHG 排出削減効果は得られなくなる。一方、熱利用効率を 75% まで改善することができれば、現状の 3 倍の GHG 排出削減効果が期待できる。
5. 代替する化石燃料として灯油や重油を想定すると、現状の LPG と比べて GHG 排出削減効果が大きくなる。ただし、熱利用効率の変化と比較すると結果への影響は小さい。

本研究で対象とした木質バイオマス地域熱供給システムは現状において熱需要が十分でなく、熱利用効率は高くなかった。今後町役場庁舎や一般住宅において安定した熱需要が確保できれば、熱利用効率が向上し GHG 排出削減効果も増加すると考えられ、今後の継続的なモニタリングが重要である。また、他の地域における木質バイオマス地域熱供給システムの LCA を実施し、本研究結果との比較および日本全体における知見を蓄積することも今後の主要課題である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、A 社および B 社の方々に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。本研究は、環境省第Ⅲ期「環境経済の政策研究」および科研費 15H02863 の支援により行われました。

文 献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : Climate Change 2014. Fifth Assessment Report, Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press, New York, 2014.
- 2) 資源エネルギー庁：再生可能エネルギーの固定価格買取制度ガイドブック. 資源エネルギー庁, 東京, 2015.
- 3) Manomet Center for Conservation Sciences: Biomass sustainability and carbon policy study. NCI-2010-03, Manomet Center for Conservation Sciences, Massachusetts, 2010.
- 4) 森のエネルギー研究所：木質バイオマス人材育成事業実施報告書, 森のエネルギー研究所, 東京, 2012.
- 5) 古俣寛隆, 酒井明香, 八坂通泰, 石川佳生, 服部順昭：林地残材を用いた発電のライフサイクルアセスメント —温室効果ガス排出量の削減に関する一考察—. 木材学会誌 **59**(1), 22-28 (2013).
- 6) 古俣寛隆, 折橋 健, 石川佳生, 一重喬一郎, 服部順昭：北海道産木質ペレットのライフサイクルアセスメントによる環境影響評価. 木材学会誌 **56**(3), 139-148 (2010).
- 7) 石坂和明, 村山克己, 伊坪徳宏：ペレットストーブのライフサイクル環境影響評価. 日本LCA学会誌 **3**(1), 45-51 (2007).
- 8) Higo, M., Dowaki, K.: A Life Cycle Analysis on a Bio-DME production system considering the species of biomass feedstock in Japan and Papua New Guinea. *Appl. Energy* **87**, 58-67 (2010).
- 9) Sunde, K., Brekke, A., Solberg, B.: Environmental impacts and costs of woody Biomass-to-Liquid (BTL) production and use — A review. *For. Policy Econ.* **13**, 591-602 (2011).
- 10) Pucker, J., Zwart, R., Jungmeier, G.: Greenhouse gas and energy analysis of substitute natural gas from biomass for space heat. *Biomass Bioenergy* **38**, 95-101 (2012).
- 11) 一重喬一郎, 服部順昭：製材残材のエネルギー利用における温室効果ガス排出量の評価. 木材学会誌 **57**(2), 63-71 (2011).
- 12) Bram, S., De Ruyck, J., Lavric, D.: Using biomass: A system perturbation analysis. *Appl. Energy* **86**, 194-201 (2009).
- 13) Kayo, C., Aramaki, T., Hanaki, K.: Effect of change of forest carbon storage on net carbon dioxide balance of wood use for energy in Japan. *J. Ind. Ecol.* **15**(1), 122-136 (2011).
- 14) Puettmann, M. E., Lippke, B.: Woody biomass substitution for thermal energy at softwood lumber mills in the US Inland Northwest. *For. Prod. J.* **62**(4), 273-279 (2012).
- 15) 紫波町：紫波町暮らしのガイドブック, 紫波町役場, 紫波町, 2015.
- 16) 紫波グリーンエネルギー：紫波中央駅前エネルギーステーション事業紹介資料, 紫波グリーンエネルギー, 紫波町, 2015.
- 17) 森林総合研究所：木材工業ハンドブック改訂3版, 丸善, 東京, 1982, p. 103.
- 18) 日本国：京都議定書3条3及び4の下でのLULUCF活動の補足情報に関する報告書, 日本政府, 東京, 2009.
- 19) 岩岡正博, 一二三雅透：木材生産作業のエネルギー消費と二酸化炭素排出量（後編）. 機械化林業 **655**(6), 1-6 (2008).
- 20) 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.
- 21) 産業環境管理協会：MiLCAデータベース, 産業環境管理協会, 東京, 2014.
- 22) The International Organization for Standardization (ISO) : Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication, The International Organization for Standardization, Geneva, 2013, p. 52.
- 23) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : Climate Change 2013, Fifth Assessment Report, The Physical Science Basis, Cambridge University Press, New York, 2013.
- 24) Abe, F.: Calorific value of Japanese coniferous wood. *Bull. For. For. Prod. Res. Inst.* **338**, 91-100 (1986).
- 25) 森林総合研究所：木材工業ハンドブック改訂4版, 丸善, 東京, 2004, p. 1037.