大規模収集を考慮した木質バイオマスのエネルギー利用システム設計と
混焼発電への応用古林 敬顕^{*1}, 森上 慶太^{*2}, 中田 俊彦^{*1}Design of woody biomass energy system considering wide area collection and application to coal
co-firing in Tohoku areaTakaaki FURUBAYASHI^{*1}, Keita MORIKAMI^{*2} and Toshihiko NAKATA^{*1}^{*1} Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-11-815 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{*2} Department of Management Science & Technology, Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-11-816 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

Received 31 July 2014

Abstract

The purpose of the study is to design a woody biomass energy system and application to coal co-firing, and to evaluate the system considering the three dimensions of energy, economic, and environmental impact. The study targets five types of woody biomass; forest wood residues, forest thinnings, sawmill wood residues, construction wastes and pruned branches of fruit trees. The system contains of collecting of biomass, transporting raw materials, producing wood fuels, transporting wood fuels, and coal co-firing. The study evaluates six cases that differ in wood fuel production location and the type of wood fuel. The results of case study show that the potential of the biomass resource is 37 PJ/year and the availability is 3.6 PJ/year in Tohoku area. The case that pellets produced at the resource generation points has the lowest amount of energy consumption 0.9 PJ/year, wood fuel supply cost 3.2 JPY/MJ and CO₂ emissions 0.66×10^3 t-CO₂/year. It is also obtained that the drying process and transportation process have dominant effect on energy consumption and cost.

Key words : Woody biomass, Supply chain networks, Coal co-firing, Energy system, Economic analysis, GIS

1. 緒 言

木質バイオマスは、19世紀までは薪炭としてエネルギーの主流であったが、21世紀になってからは環境影響低減や地域エネルギー資源の有効利用といった観点から見直されつつある。北欧では、石炭火力発電所での混焼や地域熱供給等の燃料として、木質バイオマスのエネルギー利用が普及し、多くの燃料を安定供給するシステム設計の研究や実証が進んでいる。Sultana らは、地理情報を用いて資源分布を考慮した、バイオマスのエネルギー利用システムの設計手法を提案している (Sultana and Kumar, 2012)。一方、日本では、碧南火力発電所や西条火力発電所等で 3%程度の混焼発電を行っているが、燃料となる大量のバイオマスを輸入する事例が多く、国内資源の大規模な利用は進んでいない。その理由として、日本は急峻な山地が多く、伐採と集積に手間を要し、木材を大規模にエネルギー利用する仕組みが未整備であることが挙げられる。したがって、わが国の広範囲から国内資源を収集し利用する仕組みを構築するため、各地域の賦存量や木材性状に合わせたエネルギー利用システムの設計研究が重要である。国内を対象としたシステム設計の研究事例として、八木ら (八木, 中田, 2007) や山本ら (山本他, 2007)は、対象地域をメッシュ状に分割して、各メッシュのバイオマス賦存量やメッシュ間の輸送距離等を

No.14-00395 [DOI:10.1299/transjsme.14-00395], J-STAGE Advance Publication date : 18 March, 2015

^{*1} 正員, 東北大学 大学院工学研究科 (〒980-859 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-11-815)

^{*2} 東北大学 大学院工学研究科 技術社会システム専攻 (〒980-859 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-11-816)

E-mail of corresponding author: nakata@m.tohoku.ac.jp

考慮して、プラントの規模や最適立地を求めた。また、地理情報システム (GIS) を応用した研究として、木下ら (Kinoshita, et al., 2009) や山元 (山元他, 2010) らの研究が挙げられる。木下らは、高知県の構原町を対象として、地理情報を考慮した伐採コストと伐採量の関係を求めた。山元らは、東北地方を対象として、製材残材、稲わら、もみ殻を大規模に収集して石炭火力発電所で混焼するシステムを設計した。しかし、複数の木質バイオマス資源を対象として、資源の前処理施設の配置を考慮した国内のシステム設計に関する研究はまだない。

本研究は、資源の伐採からエネルギー変換までを対象範囲として、複数の国内資源を考慮した木質バイオマスのエネルギー利用システムを設計することを目的とする。また、東北地方を対象としたケーススタディを通して、システム性能をエネルギー収支、経済性、CO₂排出量の3指標にもとづいて定量評価する。

2. 設計手法

2・1 システム構成要素

本研究にて想定するエネルギー利用システムのコンセプトを図1に示す。システムの構成要素として、(a) 資源の収集、(b) 前処理 (乾燥、チップ化、ペレット化)、(c) エネルギー変換の3つを考慮する。また、各工程は、資源発生地点 (伐採、集積)、前処理施設 (乾燥及び燃料製造)、需要地点 (エネルギー変換) の3地点で行われるとして、(d1) (d2) 各地点間における資源及び木質燃料の輸送を考慮する。各構成要素の詳細を以下に記す。

資源 (図1中の (a)) は、国内の木質バイオマスのなかから、製材残材、建築廃材、林地残材、間伐材、果樹剪定枝の5種類を対象とする。各賦存量と利用可能量は、NEDOの推計式(NEDO, 2011)と各県の統計データから推計する。対象とする5種類の資源発生量 (賦存量) は、敷料等のマテリアル利用されている量を含むために、未利用資源と廃棄物処理されている資源の両方を利用可能量として定義する。伐採、集積では、発生する資源を各市町村の中心地点に収集することを想定する。

前処理工程 (図1中の (b)) では、収集したバイオマス資源を乾燥して、チップ又はペレットに加工する。乾燥工程では、各資源の含水率を低減する。本研究で対象とする資源は、発生過程が異なるため、それぞれの含水率は異なると考えられる。そのため、前処理する段階ですべての資源の含水率が同じになるように、人工乾燥を施す。チップとペレットを比べると、加工に要するエネルギーはチップがペレットに比べて少ないが、チップのかさ密度が小さいため、輸送に要するエネルギーはペレットに比べて大きい。

エネルギー変換 (図1中の(c)) は、現在国内で木質バイオマスの大規模エネルギー利用として、本研究では石炭混焼発電をケーススタディとして扱う。

輸送は、未加工の各資源の輸送 (図1中の (d1)) と、前処理後の木質燃料 (チップ又はペレット) の輸送 (図1中の (d2)) を考慮する。未加工の資源は、各市町村の中心地から前処理プラントまで輸送する。木質燃料は前処理プラントで加工された後に、需要地である石炭火力発電所まで輸送する。それぞれの輸送経路と距離は、地理情報システム (Geographical Information System: GIS) の機能を利用して、ダイクストラ法を用いて算出する。

Fig.1 Component of woody biomass energy system

2・2 資源の賦存量及び利用可能量の推計

本研究は、5種類の木質バイオマスを対象として、各県毎の賦存量 (Potential) と利用可能量 (Availability) を算出する。ここで、賦存量とは発生する資源の総量、利用可能量とは賦存量のなかで実際の利用可能量と定義する。なお、製材残材、建築廃材、林地残材、未利用間伐材の各市町村別の賦存量及び利用可能量は、各県の賦存量と利用可能量に、各市町村の林業従事者数が県全体の林業従事者数に占める割合を乗じて算出する。特に記述がない場合、質量は湿潤基準とする。

2・2・1 製材残材

製材残材は、製材工場、合板工場、チップ工場等から発生する樹皮、背板、端材、べら板、おが屑、プレーナ一屑、チップ屑と定義する。賦存量は、都道府県別の素材生産量（農林水産省，2011）に廃材発生率を乗じて算出する。樹種別の体積基準の廃材発生率を表 1 に示す。各製材残材は、残材の利用・処理方法別数量のうち、焼却及びその他が利用可能である（伊神，村田，2003）として、表 2 に廃材種類別のかさ密度及び体積基準の利用可能率を示す。

Table 1 Sawmill residue incidence rates

Wood species	Incidence rate [%]						
	Bark	Backboard	Mill ends	Thin board	Sawdust	Planer dust	Chip dust
Pinus densiflora, Black pine	15.8	20.2	4.7	1.2	20.8	2.0	1.0
Cedar, Cypress	18.0	19.2	4.8	1.0	21.2	5.3	1.0
Larch	17.2	21.1	4.1	0.7	19.2	3.6	1.3
Picea jezoensis, Abies sachalinensis	13.2	29.2	4.7	0.3	20.7	2.5	0.2
Other acicular tree	15.8	20.2	4.7	1.2	20.8	2.0	1.0
Broad-leaf tree	21.3	28.0	5.1	1.2	21.4	3.8	1.2

(Ikami and Murata, 2003)

Table 2 Mass densities and available rates

	Bark	Backboard	Mill ends	Thin board	Sawdust	Planer dust	Chip dust
Mass density [t-wet/m ³]	0.45	0.57	0.57	0.57	0.5	0.5	0.57
Available rate [%]	13.8	0.4	12.0	65.0	6.6	7.6	40.3

(Forestry and Forest Products Research Institute, 2010)

2・2・2 建築廃材

建築物の解体時に発生する建築廃材は、平成 20 年の解体床面積に建築廃材木材発生係数を乗じて算出して、利用可能量はこれに最終処分率を乗じて算出する。平成 20 年の解体床面積は、平成 19 年と平成 20 年の木造建築物の総床面積（総務省，2008，2009）の差と、平成 19 年の着工床面積（国土交通省，2007）を合算した値とする。各建築物の建築廃材木材発生係数を表 3 に示す。また、最終処分率は、建設発生木材量が 410 万 t（国土交通省，2010），最終処分量が 43 万 t（国土交通省，2010）なので、最終処分量と建築発生木材量の質量比の 10.5%とする。

Table 3 Woody residue incidence rates

	Wooden construction	Reinforced concrete structure	Others
Incident rate of construction waste [t-dry/m ²]	0.1	0.005	0.008

(NEDO, 2011)

2・2・3 林地残材

林地残材は、樹木の伐採時に林地に放置される、丸太以外の末木、樹枝、根元部の総和である定義する。木材需給報告書（農林水産省，2011）をもとに、素材生産量と立木換算係数及び表 4 に示す体積基準の樹種別林地残材率から賦存量を算出する。利用可能な林地残材の収集範囲は、林道から山側・谷側斜面に各 25m ずつ設定して、合計 50m 幅以内に賦存する量を利用可能量とした（NEDO，2011）。各地域の森林面積と林道は、林業統計等（宮城

県農林水産部, 2011) (秋田県農林水産部, 2011) (青森県林政課, 2009) (山形県農林水産部, 2011) (福島県農林水産部, 2010) (岩手県, 2011) (林野庁, 2009)の値を用いた。

Table 4 Forest residue incidence rates

Wood species	Forest residue incidence rates [%]
Cedar, Cypress	15
Pines	19
Other acicular tree	24
Broad-leaf tree	35

(Ringyoukagakugijutusinnkoujo, 1985)

2・2・4 間伐材

間伐材の賦存量は、国有林と民有林に分けて定義する。国有林から発生する間伐材の賦存量は、全国で $1,951,000\text{m}^3$ (内閣府規制会議農林水産業 TF, 2009)とする。各県毎の賦存量は、各県の国有林の間伐面積を全国の国有林の間伐面積で除算した、面積比を用いて求める。全国の民有林から発生する間伐材の賦存量は、間伐材の利用量 (林野庁林政部企画課, 2011)を利用率 0.3 (NEDO, 2011)で除算して、さらに未利用率 0.7 を乗算して算出する。各県の民有林の賦存量は、国有林と同じく、各県の間伐面積と全国の間伐面積の比を用いて、全国の賦存量から求める。利用可能量は、林地残材と同じく、林道から側面各 25m を収集距離として、合計 50m 幅以内の賦存量を利用可能量と考えた。

2・2・5 果樹剪定枝

果樹剪定枝の賦存量は、果樹栽培面積と単位面積あたりの剪定枝発生原単位 (NEDO, 2011) を用いて算出する。利用可能量は、利用可能率 0.76 (NEDO, 2011)を賦存量に乘算して求める。各県の果樹栽培面積は、農林水産省の統計資料の値 (農林水産省, 2005) を参照した。

2・3 システムの性能評価

上記の前提にもとづいて設計したシステムの性能を、以下に述べるエネルギー、環境影響、経済性の指標にもとづいて評価する。

2・3・1 エネルギー収支の評価

エネルギーの指標は、木質バイオマスシステム全体のエネルギー投入量 $E_{M,in}$ [MJ/yr] (式(1)) とエネルギー収支比 EROI (Energy return on investment) (式(2)) を用いて評価する。

$$E_{M,in} = \sum_B \sum_i (E_{\text{harvest},B,j} + E_{\text{trans1},B,j} + E_{\text{drying},B,j} + E_{\text{prepro},B,j} + E_{\text{trans2},B,j}) \quad (1)$$

$$EROI = E_{\text{out}} / E_{M,in} \quad (2)$$

$$E_{\text{out}} = W_{BF} \times LHV_{BF} \quad (3)$$

$$E_{\text{harvest}} = W_{B,j} \times e_{\text{harvest}} + d_{\text{harvest},B,j} \times (N_{\text{trans},j} + 1) \times e_{\text{trans}} \quad (4)$$

$$E_{\text{trans1},B,j} = \frac{W_{B,j}}{TL} \times 2d_j \times e_{\text{trans}} \quad (5)$$

$$E_{\text{prepro},B,j} = E_{\text{drying},B,j} + E_{\text{prod},B,j} = W_{B,j} \times e_{\text{drying}} + W_{\text{dried},B,j} \times e_{\text{prod},B,j} \quad (6)$$

$$E_{\text{trans2},k} = \frac{W_{BF,k}}{TL} \times 2d_k \times e_{\text{trans}} \quad (7)$$

ここで、 E_{out} [MJ/yr] はエネルギー変換施設に供給された木質バイオマスのエネルギー量、 LHV [MJ/kg] は低位発熱量、 W [kg/yr] は木質バイオマス又は木質燃料の量、 e は各過程の単位質量あたりのエネルギー消費量 [MJ/kg]、 d は輸送距離 [km]、 N は収集に要するトラックの台数 [-]、 TL はトラックの積載量 [t] を示す。添字の *harvest* は伐採・集積、*trans1* は原材料の輸送、*trans2* は木質燃料の輸送、*prepro* は前処理、*drying* は乾燥、*prod* は木質燃料製造の各工程を示す。また、添え字の B は木質バイオマス資源の種類、 BF は木質燃料の種類、 j は各市町村、 k は前処理プラント、*dried* は乾燥後をそれぞれ示す。乾燥でのエネルギー消費量 e_{drying} は、初期含水率、乾燥後の含水率等を入力値として、蒸発潜熱、空気や木材、水分の昇温、壁面からの放熱量等の和で表される式 (寺島, 2004) から導出する。乾燥設備の規模によって壁面からの放熱量が異なるため、乾燥設備の容量と、単位質量あたりのエネルギー消費量の関係を、初期含水率を変化させて図2に示し、得られた近似式から乾燥でのエネルギー消費量 e_{drying} を求める。図2から、設備容量の大規模化に伴い、放熱量の影響が減少するため、単位質量の木質バイオマスの乾燥に要するエネルギー消費量が減少している。収集、輸送、燃料製造の各工程のエネルギー消費量等を、表5、表6、表7に示す。表7の *Pelletizing* のエネルギー消費量は、二次破砕、成形、冷却を含む。

Fig. 2 Capacity and energy consumption of drying process

Table 5 Parameters of harvest process

Parameter	Value	Unit
Operating cost	926.0	JPY/h
Loading rate	5.8	t/h
Kerosene price	130.0	JPY/L
Heating value of Kerosene	36.4	MJ/L
Unit energy consumption	44.5	MJ/t

(Shimane prefecture, 2009)

Table 6 Parameters of transportation process

Parameter	Value	Unit
Freight tonne	4.0	t
Carrying capacity	6.0	m ³
Fuel consumption rate	7.3	km/L
Heating value of fuel	36.4	MJ/L
Unit energy consumption	5.0	MJ/km

(Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation), (Takatoshi Co.,Ltd.),
(The Institute of Energy Economics, 2012)

Table 7 Parameters of woody fuel production process

Fuel type	Parameter	Value	Unit
Chipping	Annual production quantity	40,000	t/year
	Annual energy consumption	748,000	kWh/year
	Unit energy consumption	19	kWh/t
Pelletizing	Annual production quantity	40,000	t/year
	Annual energy consumption	3,603,600	kWh/year
	Unit energy consumption	324	kWh/t

(Obernberger, 2010)

2・3・2 環境影響の評価

環境影響は、システム全体の CO₂ 排出量 $CO_{2_emission}$ [t-CO₂/year] (式(8)) と、正味の CO₂ 排出削減量 CO_{2_net} [t-CO₂/year] (式(10)) にもとづいて評価する。

$$CO_{2_emission} = CO_{2_harvest} + CO_{2_trans1} + CO_{2_prepro} + CO_{2_trans2} \quad (8)$$

$$CO_{2_reduction} = E_{out} \times co_{2_fossil_fuel} \quad (9)$$

$$CO_{2_net} = CO_{2_reduction} - CO_{2_emission} \quad (10)$$

ここで、 $CO_{2_reduction}$ [t-CO₂/year] は、木質バイオマスで化石燃料を代替することによる CO₂ 排出削減量、 $co_{2_fossil_fuel}$ [t-CO₂/MJ] は代替される化石燃料の CO₂ 排出原単位を示す。各過程 i の CO₂ 排出量 E_i [t-CO₂/year] は、エネルギー消費量に CO₂ 排出原単位を乗算して求める。このとき、収集及び輸送は軽油を、乾燥は重油を、燃料製造は電力をそれぞれ用いるとして、各種燃料の CO₂ 排出原単位を表 8 に示す。

Table 8 CO₂ emission factors

Fuel	CO ₂ emission factor
Coal	9.1 t-CO ₂ /10 ⁵ MJ
Kerosene	6.9 t-CO ₂ /10 ⁵ MJ
Heavy oil	6.9 t-CO ₂ /10 ⁵ MJ
Electricity	11.9 t-CO ₂ /10 ⁵ MJ

(The Institute of Energy Economics, 2012),
(Ministry of Environment, 2012)

2・3・3 経済性の評価

経済性指標は、木質燃料供給コスト $Cost_{total}$ [JPY/year] (式(11)) にもとづいて評価する。各過程に要するコストを式(12)から式(18)にそれぞれ示す。

$$Cost_{total} = \sum_B \sum_j (Cost_{harvest,B,j} + Cost_{trans1,j}) + \sum_k \left(\sum_B Cost_{prepro,B,k} + Cost_{trans2,k} \right) + Cost_{replace} \quad (11)$$

$$Cost_{harvest} = W_{B,j} \times cost_{harvest} + d_{harvest,B,j} \times (N_{trans,j} + 1) \times cost_{trans} \quad (12)$$

$$Cost_{trans1,B,j} = \frac{W_{B,j}}{TL} \times 2d_j \times cost_{trans} \quad (13)$$

$$Cost_{prepro,B,k} = Cost_{drying,B,k} + Cost_{prod,B,k} \quad (14)$$

$$Cost_{drying,B,j} = Capital_{drying,base} \times \frac{W_{B,j}}{Cap_{drying,base}} \times CRF_{drying} + E_{drying} \times cost_{HO} \quad (15)$$

$$Cost_{prod,B,j} = Capital_{prod,base} \times \left(\frac{W_{B,j}}{Cap_{prod,base}} \right)^{s_{prod}} \times CRF_{prod} + E_{prod} \times cost_{elect} \quad (16)$$

$$Cost_{trans2,B,k} = \frac{W_{BF,k}}{TL} \times 2d_k \times cost_{trans} \quad (17)$$

$$Cost_{replace} = Capital_{replace} \times \left(\frac{Cap_{replace}}{Cap_{replace,base}} \right)^{0.9} \times CRF_{replace} \quad (18)$$

ここで, $cost$ は各過程の単位量あたりのコスト [JPY/t], [JPY/km], 又は[JPY/MJ]等, $Capital$ は設備費用 [JPY], CRF は資本回収係数 [-], Cap は設備の設備容量[t/year], s はスケールファクター[-], をそれぞれ示す。また, 添字 HO は重油, elect は系統電力, base は基準設備, replace はエネルギー変換施設の改修をそれぞれ示す。単位走行距離あたりの輸送コストは, 表 9 に示す輸送車両の仕様から求める。前処理施設及びエネルギー変換施設の改修の設備費用は, 式 (16) 及び式 (18) に示されるように, スケールメリットを考慮する。既存施設の事例調査(中国経済産業局, 2007) (Francescato, et al., 2008) (愛媛県内子町, 2007) (宮城県登米市, 2011) (Houdek and McCloy, 2012)から, チップ化設備のスケールファクターを 0.84, ペレット化設備のスケールファクターを 0.86 とした。スケールメリットを考慮する場合, 基準となる設備の容量, コスト等の値を用いるため, 基準とする前処理施設の設定を表 10 と表 11 に示す。

Table 9 Cost of transportation process

Parameter	Value	Unit
Truck cost	5,287,114	JPY
Transportation distance per day	240	km/day
Annual working days	230	day
Maintenance cost	6	JPY/km
Labor cost	4,016,520	JPY/year
Fuel price	130	JPY/L
Interest rate	0.03	-
Life time	5	year

(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2008)

(Ministry of Health, Labour and Welfare, 2010) (National Tax Agency),

(Isuzu), (The Institute of Energy Economics, 2012)

Table 10 Cost and capacity of drying facility

Parameter	Value	Unit
Capital cost	35,000,000	JPY
Annual working days	240	day/year
Drying capacity per day	42	m ³ /day
Annual drying capacity	2,016	m ³ /year

(Terashima, 2004)

Table 11 Cost and capacity of woody fuel production facilities

Fuel type	Parameter	Value	Unit
Chipping	Capacity	40,000	t-wet/year
	Capital cost	35,500,000	JPY
	Scale factor	0.84	-
	Interest rate	0.03	-
	Life time	10	year
Pelletizing	Capacity	40,000	t-wet/year
	Capital cost	260,000,000	JPY
	Scale factor	0.86	-
	Interest rate	0.03	-
	Life time	10	year

(Chugoku Bureau of Economy, 2007) (Francescato, et al., 2008),

(Ehime prefecture, 2007), (Miyagi prefecture, 2011), (Houdek and McCloy, 2012)

2・4 東北地方を対象としたケーススタディ

本研究にて作成した設計手法の実証を目的として、東北地方の石炭火力発電所での混焼を対象としてケーススタディを行う。石炭火力発電所の仕様は、一般的な発電所を想定して、設備容量 500MW、設備稼働率 78%、変換効率 40%とする。また、木質燃料を発電所内にて運搬、貯蔵するためのベルトコンベアーやサイロを発電所内に設置して、ボイラー、タービンは石炭専焼時の設備をそのまま使用する。ミルは、木質燃料の形態によって、改造が必要となる（株式会社 IHI, 2012）。発電所の立地点は、秋田県北部と仮定した。

ケース設定は、木質燃料の形態としてチップとペレットの 2 種類、前処理施設の立地として資源発生地点、中間地点、需要地点の 3 地点をそれぞれ対象として、合計 6 ケースを考慮する。表 12 に各ケースの設定を示す。燃

料形態の違いは、輸送車両への積載量に影響し、前処理施設の立地場所の違いは、輸送経路や集約量に影響する。中間地点は、気象庁が警報等の発表に用いる地域区分である、二次細分区域の面積重心とする。図3に、資源の発生地点、中間地点、石炭火力発電所の立地を示す。

Table 12 Case setting

Type of fuel	Location of preprocessing facility		
	Biomass resource generation point	Middle point	Demand point (Coal fired plant)
Wood Chip	Case C1	Case C2	Case C3
Wood Pellet	Case P1	Case P2	Case P3

Fig. 3 Locations of biomass resource generation points, middle points, and coal fired plant

3. システム設計と性能評価

3・1 賦存量及び利用可能量

試算の結果、東北地方の資源の賦存量は 37 PJ/year, 利用可能量は 3.6 PJ/year となった (図 4). これは、500MW 級の石炭火力発電所に投入される燃料の熱量の 122%, 12%にそれぞれ相当する。ただし、未利用間伐材の丸太以外の部分は林地残材に含まれる可能性があるため、賦存量と利用可能量から減算しなければならない。このとき、賦存量は 36PJ/year, 利用可能量は 3.6PJ/year と、わずかに減少する。本研究では、利用可能量 3.6PJ/year をすべて混焼利用することを想定したので、混焼率は 12%とした。賦存量の内訳をみると、製材残材が 40%, 間伐材が 27%となった。一方、利用可能量の内訳をみると、製材残材が 36%, 果樹剪定枝が 31%であり、間伐材は 10%となった。林地残材や間伐材は、他の資源と比較すると、賦存量に比べて利用可能量が少ない。これは、林道の両側各 25m を収集範囲としたためであると考えられる。林道の延長整備や、広範囲を効率的に収集することができる最新機器の導入等によって、利用可能量が大きく増加する余地があると考えられる。

Fig. 4 Potential and availability of each resource

3・2 輸送経路の最適化

設定した6ケースにて求めた最適輸送経路を、図5に示す。最短経路と輸送距離は、地理情報システムのソフトウェアであるArcGIS10と、そのソルバーのひとつArcGIS Network Analystを使用して算出した。ケースP3,C3の最適輸送経路は、ケースP1,C1と同様の経路となった。これは、中間地点を考慮していない場合には、輸送経路はバイオマス資源や木質燃料に依存しないためと考えられる。

Fig. 5 Transportation network

3・3 エネルギー消費量及びエネルギー収支比

設定した6つのケースのエネルギー消費量と、発電所に供給された木質燃料のエネルギー量を比較した結果を図6に示す。図中のすべてのケースにて、木質燃料によるエネルギー供給量は、エネルギー消費量よりも大きい

ことがわかる。ペレットを製造する場合には、エネルギー消費量は 0.91-2.0 PJ/year となり、チップを製造する場合には、エネルギー消費量は 1.1-2.0 PJ/year となった。

エネルギー投入量の内訳をみると、どのケースでも乾燥が大きな割合を占めている。輸送に伴うエネルギー消費量は、輸送経路が同じであるにも関わらず、ケース P1 及びケース C1 に比べてケース P3 及びケース C3 が大きい。これは、未加工の資源のかさ密度が小さく、かつ含水率が高いためだと考えられる。また、ペレット化では、チップ化に比べて燃料製造に伴うエネルギー消費量は大きいですが、かさ密度が大きいために、ペレットの輸送に伴うエネルギー消費量はチップよりも少ない。そのため、大規模収集を想定した場合には、システム全体のエネルギー消費量を低減するためにはペレット化の方が適していることがわかった。

Fig. 6 Energy balance

次に、バイオマス資源や木質燃料のかさ密度の変化を考慮したエネルギー収支比を、図 7 に示す。各ケースを比べると、チップ化に比べてペレット化の変化の幅は小さく、また、資源発生地点に近い位置で前処理するほど変化の幅が小さくなる。これは、未加工のバイオマス資源やチップはかさ密度の変化が大きく、輸送に与える影響が大きいと考えられる。一方、ペレットは加工時に成形するので、かさ密度の幅がチップ等に比べて小さい。そのために、資源発生地点でペレットに加工するケースのエネルギー収支比の変化が最も小さい結果となった。

Fig. 7 Energy return on investment of each case considering density fluctuation

Fig. 8 Energy flow (Case P1)

最もエネルギー消費量が少ないケース P1 を例として、資源から発電までのエネルギーフローを図 8 に示す。高位発熱量 3.94 PJ の木質バイオマスは 1.4 PJ の電力に変換され、その際に投入される化石燃料は 0.91 PJ となった。図から、乾燥工程にて木質バイオマスの含水率が減少し、発熱量が 3.3 PJ から 3.6 PJ に増加することがわかる。このとき、含水率が低減することによりバイオマス資源の質量が変化するために、単位質量あたりの低位発熱量が大きく増加する。含水率を低減しなかった場合には、輸送する資源の重量が大きいために、ケース P3 のように輸送に伴うエネルギー消費量が大きくなる。また、含水率を低減するために、システム全体のエネルギー消費量の約 55%に相当する、0.5GJ の重油を消費している。このことから、さらに効率的に乾燥することによって、システム全体のエネルギー効率を向上する余地があるといえる。

以上の結果から、資源の性状のうち、かさ密度と含水率がシステムの性能に大きく影響することが明らかとなった。したがって、システム性能を向上させるためには、乾燥工程にて少ない化石燃料で含水率を減少させること、チップ化、ペレット化の燃料製造工程にてかさ密度を増加させることが重要である。

3・4 CO₂ 排出量

設定した 6 つのケースの CO₂ 排出量を比較した結果を、図 9 に示す。木質燃料によって石炭が代替されるため、すべてのケースで $325 \times 10^3 \text{ t-CO}_2/\text{year}$ が削減される。ペレットを製造する場合には、CO₂ 排出量は $66\text{--}144 \times 10^3 \text{ t-CO}_2/\text{year}$ となり、このときの正味の CO₂ 排出削減量は、 $181\text{--}259 \times 10^3 \text{ t-CO}_2/\text{year}$ となった。チップを製造する場合、CO₂ 排出量は $73\text{--}137 \times 10^3 \text{ t-CO}_2/\text{year}$ となり、このときの正味の CO₂ 排出削減量は、 $188\text{--}251 \times 10^3 \text{ t-CO}_2/\text{year}$ となった。 $251 \times 10^3 \text{ t-CO}_2/\text{year}$ の CO₂ 削減量は、石炭専焼時の CO₂ 排出量の 9.6%に相当する。資源の利用可能量から、混焼率は熱量換算で 12%なので、各過程での CO₂ 排出に伴い、正味の CO₂ 排出削減量は小さくなった。

CO₂ 排出量の内訳をみると、エネルギー消費量と同様に、すべてのケースで乾燥が大きな割合を占めた。未加工のバイオマス資源を発電所まで輸送するケース C3, P3 の場合には、他のケースに比べて輸送に伴う CO₂ 排出量が非常に多い。特に、ケース P3 の場合に、ペレット化に伴うエネルギー密度増加等の利点を活かすことができないため、すべてのケースの中で最も CO₂ 排出量が多くなった。CO₂ 排出量を低減するためには、エネルギー収支と同様に、資源発生地点近くにて加工することと、乾燥効率を上げることが有効であるといえる。

資源発生地点近くにてペレット化する場合には、エネルギー消費量に占める輸送行程の割合は小さいために、CO₂ 削減量は混焼率にほぼ比例すると考えられる。混焼率を 3%とすると、CO₂ 排出量は約 2.4%削減される。

Fig. 9 CO₂ emissions of each case compared with conventional coal fuel consumption

3・5 木質バイオマス供給コスト

図 10 に、設定した 6 つのケースの木質燃料供給コストを比較した結果を示す。ペレットを製造する場合は、総コストは $1.15\text{--}5.05 \times 10^{10}$ JPY/year となり、チップを製造する場合には、総コストは $1.37\text{--}4.86 \times 10^{10}$ JPY/year となった。この場合の CO₂ 排出量削減コストは、ペレット製造では $4.4\text{--}27.9 \times 10^4$ JPY/t-CO₂、チップ製造では $5.4\text{--}25.8 \times 10^4$ JPY/t-CO₂ となった。この値は、日本の平均的な CO₂ 削減費用と比較して割高である。また、単位エネルギー量あたりの供給コストは、ペレットの場合は 3.2–14.6 JPY/MJ、チップの場合は 3.8–13.5 JPY/MJ となった。資源発生地点でペレットを製造するケース P1 にて、3.2 JPY/MJ と最も安価となった。

各ケースの内訳を見ると、輸送コストの割合が 20–85% と大きく、特に未加工のバイオマス資源を輸送するケース C3, P3 では、輸送コストが 82–85% と大部分を占める。本研究では東北地方全域を対象とした大規模収集を想定したために、最長輸送距離は約 450km となり、他のシステム研究に比べて輸送の影響が大きいと考えられる。また、スケールメリットを考慮しているため、資源発生地点で前処理するケース C1 及びケース P1 は、他のケースに比べて前処理施設の設備費用が大きい。しかし、前処理施設の設備費用と輸送コストがトレードオフの関係にあり、前処理施設の設備費に比べて輸送コストの影響が大きいので、資源発生地点近くにて前処理することで木質燃料供給コストを低減することができる。

本研究では、利用可能な木質バイオマスを全量利用することを想定しているが、混焼率を低減して需要量を定めた場合には、発電所近傍の安価な資源から導入される。図 11 に、ケース P1 の輸送距離と木質ペレット供給コストとの関係を示す。ケース P1 の場合には、前処理プラントは分散しているのでスケールメリットが効かず、単位量あたりの木質ペレット製造に要するコストは収集範囲に依存しない。輸送に要するコストは収集範囲にほぼ比例する。収集に要するコストは、資源の種類によって単位量あたりの収集コストが異なるために、変動が不規則となっているが、収集範囲が狭い場合でも大きく低減はしていない。収集範囲を 50–450km まで変化させた場合、木質ペレット供給コストは 2.3–3.2 JPY/MJ となった。この値は、石炭のコスト 0.54 JPY/MJ に比べて 4–5 倍と割高である。

Fig. 10 Woody fuel production cost of each case

Fig. 11 Woody fuel supply cost depended on transportation distance in Case P1

4. 結 言

本研究は、資源の伐採から発電までの木質バイオマスのエネルギー利用システムを設計した。東北地方を対象としたケーススタディでは、木質燃料形態と前処理施設の立地に関して6つのケースを設定し、エネルギー収支、CO₂排出量、木質燃料供給コストを定量評価した。その結果、以下の結論を得た。

- 東北地方を対象とした場合、本研究で対象とした製材残材、建築廃材、林地残材、未利用間伐材、果樹剪定枝の年間賦存量は37 PJ/yearであり、そのうち利用可能量は約10%の3.6 PJ/yearとなった。
- エネルギー収支は、チップに加工する場合と比べてペレットが大きい。ペレット製造に要するエネルギー消費量は0.91-2.0 PJ/yearとなり、木質燃料として得られるエネルギー3.6 PJ/yearと比較して、エネルギー収支比は1.7-3.8となった。
- 木質バイオマスのエネルギー利用に伴うCO₂排出量は、石炭を代替することによる削減量 3.25×10^5 t-CO₂/yearに比べて小さく、正味の削減量は $1.81-2.59 \times 10^3$ t-CO₂/yearとなった。熱量換算で12%の木質バイオマスを混焼することで、石炭火力発電所から排出されるCO₂を、最大9.6%削減することができる。
- システム全体の総コストは、 $1.15-5.05 \times 10^{10}$ JPY/yearとなった。この場合のCO₂排出量削減コストは、 $4.4-27.9 \times 10^4$ JPY/t-CO₂、単位エネルギー量あたりの木質燃料の供給コストは、3.2-14.6 JPY/MJとなる。

- エネルギー消費量, CO₂ 排出量, 木質燃料供給コストの各指標にもとづいて評価した結果, 資源発生地点近くにてペレットを製造するシステムが最も CO₂ 排出量が少なく, かつ安価な供給コストで木質バイオマスをエネルギー利用することができることがわかった.
また, 設計したエネルギー利用システムの特徴として, 以下の結論を得た.
- 乾燥及び輸送に伴うエネルギー消費量が大きく, それぞれチップやペレットのエネルギー量の 14-20%, 9-33%となった.
- 輸送工程では, 資源または燃料のかさ密度がトラックの必要台数に大きな影響を与えることがわかった. 本研究のように大規模収集を想定した場合には, 資源発生地点の近傍でかさ密度を大きくすることによって, 輸送に伴うエネルギー消費量及びコストを削減することができる.
- 乾燥工程では, 設備の大規模化に伴い, 乾燥に要するエネルギー消費量に占める放熱量の割合が 16%程度となった. 本研究では国内で製材に用いられている乾燥機の利用を想定したが, 天然乾燥によって含水率を低減することや, 海外で用いられているエネルギー効率が高い乾燥機を利用することによって, 乾燥に要するエネルギー消費量を一層削減することができると考えられる.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり, 株式会社 IHI 河西英一氏に有益な助言をいただいた. 深く御礼申し上げる.

文 献

- 秋田県農林水産部, 秋田県林業統計, 平成 22 年度版 (2011).
- 秋田県農林水産部林業木材産業課編, 秋田県林業統計平成 22 年度版 (2011), p. 21, 秋田県農林水産部林業木材産業課.
- 青森県林政課, 青森県の森林・林業, 平成 21 年度版 (2009).
- 内閣府規制会議農林水産業 TF, 第 5 回 農林水産業 TF (第 2 回 林業専門部会) (2009).
- <http://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/minutes/wg/2009/0714_02/item_090714_15.pdf> (参照日 2012 年 2 月 25 日)
- 中国経済産業局, 中国地域における国産材, 林地残材・間伐材等の利活用方策の検討調査 報告書 (2007).
- 愛媛県内子町, 内子町バイオマスペレット事業可能性調査報告書 (2007).
- 林野庁, 第 60 次平成 20 年国有林野事業統計書 (2009).
- 林野庁林政部企画課, 森林・林業白書, 平成 22 年度 (2011).
- 森林総合研究所, 木材工業ハンドブック第 4 版 (2010).
- Francescato, V., Antonini, E. and Bergomi, L. Z., WOOD FUELS HANDBOOK, Italian Agriforestry Energy Association (AIEL) (2008), available from
<http://nuke.biomassradecentres.eu/Portals/0/D2.1.1%20-%20WOOD%20FUELS%20HANDBOOK_BTC_EN.pdf> (参照日 2012 年 2 月 25 日).
- 福島県農林水産部, 福島県森林・林業統計書, 平成 21 年度 (2010).
- Houdek, D. and McCloy, B., Feasibility of Developing a Northern Wood Pellet Manufacturing Business –NWT Perspective, available from
<<http://www.leafsolutions.ca/northernbioenergyconference.ca/images/Dalibor%20Houdek-Yukon.pdf>> (参照日 2012 年 2 月 25 日).
- 株式会社 IHI, 石炭焚火力の CO₂ 排出原単位半減に向けたバイオマス高比率混焼技術の開発成果報告書, 平成 23 年度地球温暖化対策技術開発等事業(2012).
- 伊神祐司, 村田光司, 製材工場における木質残廃材の発生と利用, 森林総合研究所報告 Vol.2, No.2 (No.387) (2003), pp.111-114.
- いすゞHP, トラック輸送の計数管理 (2010), available from
<http://www.isuzu.co.jp/cv/cost/keisuu/41_1.html> (参照日 2012 年 2 月 25 日).
- 岩手県, 岩手県林業の指標, 平成 21 年度版 (2011).
- Kinoshita, T., Inoue, K., Iwao, K., Kagemoto, H. and Yamagata, Y., A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS, Applied Energy, Vol. 86 (2009) pp. 1-8.
- 農林水産省, 平成 20 年木材需給報告書 (2011).

- 環境省, 平成 22 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について (2012).
- 厚生労働省, 毎月勤労統計調査全国調査 平成 22 年 1 月分 (2010).
- 総務省, 平成 19 年度 固定資産の価格等の概要調査(家屋 都道府県別表) (2008).
- 総務省, 平成 20 年度 固定資産の価格等の概要調査(家屋 都道府県別表) (2009).
- 国土交通省総合政策局情報管理部, 建築統計年報 平成 19 年度版 (2007).
- 国土交通省総合政策局, 平成 20 年度建設副産物実態調査結果 (2010).
- 三菱ふそう HP, 主要諸元表, ファイター-FK6(GVW8t)標準幅キャブ車, available from
<http://www.mitsubishi-fuso.com/jp/lineup/truck/fighter/11/lineup/dump_mixer/specification/pdf/spec_dump_full.pdf>
(参照日 2014 年 6 月 3 日).
- 宮城県農林水産部, みやぎの森林・林業のすがた平成 22 年度版 (2011).
- 宮城県登米市, 登米市地域新エネルギー重点ビジョン報告書 (2011).
- 国税庁 HP, 主な減価償却資産の耐用年数 (車両・運搬具/工具), available from
<https://www.keisan.nta.go.jp/survey/publish/30930/faq/30975/faq_32959.php> (参照日 2012 年 2 月 25 日).
- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計 (2011),
available from <<http://app1.infoc.nedo.go.jp/biomass/index.html>> (参照日 2014 年 6 月 3 日).
- Obernberger, I. and Thek, G., The Pellet Handbook (2010).
- (財)林業科学技術振興所, 林地残材の収集・搬送に関する事前評価 (1985).
- 島根県地域振興部土地資源対策課, 平成 20 年度島根県木質バイオマス石炭混焼研究会報告書 (2009).
- Sultana, A. and Kumar, A., Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system, Applied Energy, No. 94 (2012), pp. 192-201.
- 高俊興業株式会社 HP, 保有車両一覧, available from
<<http://www.takatoshi.co.jp/service/vehicle.html>> (参照日 2012 年 2 月 25 日).
- 寺島眞, 木材乾燥のすべて (改訂補強版), 海青社 (2004).
- 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット, EDMC/エネルギー・経済統計要覧 (2011 年版) (2012).
- 八木賢治郎, 中田俊彦, 資源分布と技術特性を考慮した森林バイオマス小規模ガス化システムの経済性評価, 日本エネルギー学会誌, Vol. 86, No. 2 (2007), pp. 109-118.
- 山形県農林水産部森林課, 山形県林業統計, 平成 21 年度版 (2011).
- 山本博巳, 福田桂, 井上貴至, 山地憲治, 中四国の木質バイオマス残さの収集・発電利用のシステム分析, エネルギー・資源, Vol. 28, No. 4 (2007), pp.43-48.
- 山元一史, 中田俊彦, 矢部邦明, 資源分布および輸送の最適化を考慮したバイオマス混焼システムの設計, 日本エネルギー学会誌, Vol. 89 (2010), pp.42-52.

References

- Akita prefecture, Forestry statistics of Akita prefecture in 2010 (2011) (in Japanese).
- Akita prefecture, Statistics of forestry in 2010 (2011) (in Japanese).
- Aomori prefecture, Forest and forestry of Aomori in 2009 (2009) (in Japanese).
- Cabinet Office, Government of Japan, 5th Agriculture, forest and fishery TF (2009) (in Japanese), available from
<http://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/minutes/wg/2009/0714_02/item_090714_15.pdf> (accessed on 25 February, 2012).
- Chugoku Bureau of Economy, Trade and Industry, Report of utilization of domestic lumber, forest residue, and thinned wood (2007) (in Japanese).
- Ehime prefecture, Feasibility study of biomass pellet in Uchikomachi (2007) (in Japanese).
- Forestry Agency, 60th project statistics of national forest in 2008 (2009) (in Japanese).
- Forestry Agency, White paper of forest and forestry in 2010 (2011) (in Japanese).
- Forestry and Forest Products Research Institute, Handbook of wood industry (2010) (in Japanese).
- Francescato, V., Antonini, E. and Bergomi, L. Z., WOOD FUELS HANDBOOK, Italian Agriforestry Energy Association (AIEL) (2008), available from
<http://nuke.biomassradecentres.eu/Portals/0/D2.1.1%20-%20WOOD%20FUELS%20HANDBOOK_BTC_EN.pdf>
(accessed on 25 February, 2012).
- Fukushima prefecture, Forestry statistics of Fukushima prefecture in 2009 (2010).

- Houdek, D. and McCloy, B., Feasibility of Developing a Northern Wood Pellet Manufacturing Business –NWT Perspective, available from
<<http://www.leafsolutions.ca/northernbioenergyconference.ca/images/Dalibor%20Houdek-Yukon.pdf>> (accessed on 25 February, 2012).
- IHI Corporation, Biomass-coal Co-firing Power Plant System with a High Biomass Ratio of more than 30%, Low Carbon Technology Research and Development Program (2012).
- Ikami, Y. and Murata T., Generation and Utilization of Wood Residue at Sawmills, Bulletin of FFPRI, Vol.2, No.2 (No.387) (2003), pp. 111-114 (in Japanese).
- Isuzu, Management through figures of truck transportation (2010) (in Japanese), available from
<http://www.isuzu.co.jp/cv/cost/keisuu/41_1.html> (accessed on 25 February, 2012).
- Iwate prefecture, Forestry index of Iwate prefecture in 2009 (2011) (in Japanese).
- Kinoshita, T., Inoue, K., Iwao, K., Kagemoto, H. and Yamagata, Y., A spatial evaluation of forest biomass usage using GIS, Applied Energy, Vol. 86 (2009) pp. 1-8.
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Report of lumber supply and demand in 2010 (2011) (in Japanese).
- Ministry of Environment, Net emission factors of each electric companies in 2010 (2012) (in Japanese).
- Ministry of Health, Labour and Welfare, Monthly working statistics investigation in January 2010 (2010) (in Japanese).
- Ministry of Internal Affairs and Communications, Synopsis report of fixed asset prices in 2007 (2008) (in Japanese).
- Ministry of Internal Affairs and Communications, Synopsis report of fixed asset prices in 2008 (2009) (in Japanese).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Annual report of building statistics in 2007 (2007) (in Japanese).
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Report of building by-products according to research on the actual situation in 2008 (2010) (in Japanese).
- Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation, Specification sheet of Fighter FK6(GVW8t), available from
<http://www.mitsubishi-fuso.com/jp/lineup/truck/fighter/11/lineup/dump_mixer/specification/pdf/spec_dump_full.pdf> (accessed on 3 June, 2014).
- Miyagi prefecture, Forest and forestry of Miyagi in 2010 (2011) (in Japanese).
- Miyagi prefecture, Report of local new energy in Tome city (2011) (in Japanese).
- National Tax Agency, Life time of depreciable asset, available from
<https://www.keisan.nta.go.jp/survey/publish/30930/faq/30975/faq_32959.php> (accessed on 25 February, 2012).
- New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Estimation of biomass potential and availability (2011), available from
<<http://app1.infoc.nedo.go.jp/biomass/index.html>> (accessed on 3 June, 2014) (in Japanese).
- Obernberger, I. and Thek, G., The Pellet Handbook (2010).
- Ringyoukagugijutusinnkoujo, Rinchizanzai no syusyu hansou ni kansuru jizenhyouka (1985) (in Japanese).
- Shimane prefecture, Report of wood biomass co-firing with coal in Shimane, 2008 (2009) (in Japanese).
- Sultana, A. and Kumar, A., Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system, Applied Energy, No. 94 (2012), pp. 192-201.
- Takatoshi Co.,Ltd., Automobile fleet catalog, available from
<<http://www.takatoshi.co.jp/service/vehicle.html>> (accessed on 25 February, 2012).
- Terashima, M., Drying wood (2004) (in Japanese).
- The Institute of Energy Economics, Japan, The energy data and modeling center 2011 (2012) (in Japanese).
- Yagi, K. and Nakata, T., Economic analysis on small-scale forest biomass gasification considering regional resource distribution and technical characteristics, Journal of Japan Institute of Energy, Vol 86, No. 2 (2007), pp. 109-118 (in Japanese).
- Yamagata prefecture, Forest and forestry of Yamagata in 2009 (2011) (in Japanese).
- Yamamoto, H., Fukuda, K., Inoue, T. and Yamaji, T., System analysis of collection and power generation using wood biomass residues in Chu-Shikoku region in Japan, Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 28 No. 4 (2007), pp. 43-48 (2007) (in Japanese).
- Yamamoto, H., Nakata, T. and Yabe, K., Design of biomass co-firing system considering resource distribution and transportation optimization, Journal of Japan Institute of Energy, Vol. 89 (2010), pp. 42-52 (in Japanese).