Original Paper

Economic Analysis on Small-Scale Forest Biomass Gasification Considering Regional Resource Distribution and Technical Characteristics

Kenjiro YAGI, and Toshihiko NAKATA

(Received March 30, 2006)

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 八木賢治郎, 中田俊彦

Small-scale wood biomass gasification is considered as a suitable technology to utilize forest biomass such as logging residue and unused thinned wood. Recently, more than 10 demonstration plants have started to operate to verify both technical and economic feasibility of the system. This study analyzes the economic aspect of gasification system focusing on the regional distribution of biomass resources and technical characteristics such as scale merit.

The authors developed BiRReT tool, which conducts the economic analysis of biomass energy system in a local region by finding the optimal conditions, namely plant size, plant location, and the number of plants. Case study in Miyagi prefecture had been carried out. Firstly, the economics of gasification system is compared with the steam-turbine-based CHP system that utilizes grate or fluidized-bed combustion technology. The result shows that gasification system has strong advantage in terms of low fuel transportation cost. Secondly, the economic feasibility of the system in a region is analyzed. The system with logging residue fuel has the possibility to gain economic competitiveness if technology learning and cost reduction will be seen in the capital cost and the fuel production process. Thinned wood will not be utilized only for the energy purpose.

Key Words

Forest biomass, Wood biomass gasification, Economic analysis, Local energy system

1. はじめに

近年、建設発生木材（建築廃材）等を主燃料とする木質バイオマス直接燃焼発電プラントの建設が進んでいる¹⁾。その背景には、建設リサイクル法（2000年制定）の施行や、農林水産省、環境省、NEDOなどによる、施設導入に対する各種補助制度がある。たとえば宮城県では、石巻市の合板工場や製紙工場にて導入されている²⁾。これらプラントにおける木質燃料消費量は、合わせて年間約20万トンであるが³⁾、県内の建設発生木材の総量は約9万5千トンと報告されている³⁾。つまり県内の燃料消費量は建設発生木材の県内発生量を上回っていて、東北他県や関東地方などから燃料を輸送しているのが現状である²⁾。東北他県でも直接燃焼発電プラントの建設や計画が進んでいて¹⁾²⁾、設備容量の増加に伴って安価な燃料の確保が困難になりつつある。また関東地方でも、木くずの確保が困難なために木質バイオマス発電の計画が中止となった例

が報告されている。

一方、林業の振興、適切な森林管理といった観点からも有効利用が求められる林地残材や未利用間伐材（以後、森林バイオマスと総称）は、多くの賦存量があるが⁴⁾、利活用は進んでいない。廃材処理という側面を持つ建設発生木材と製材残材が安価あるいは逆有償で取引されているのに比べて、森林バイオマスは林内の集材、トラック輸送、トラックの積込み・荷降ろしに費用がかさむからである。また森林バイオマスは、資源の発生地点が森林内に点在しているため、1ヶ所へ大量に収集すると輸送コストが高くなる。

直接燃焼発電は通常、出力約千kWe以下では、発電効率が著しく低下して経済性に劣る。出力千kWe以上のプラントでは、年間数万トン以上の燃料供給が必要となり、広範囲からの森林バイオマス資源の収集が必要のため輸送コストが高くなる。一方、現在多くのメーカーで実証試験が進められてい

るガス化発電は、数10～数100kWe程度の小規模出力でも高効率の発電が可能であるため、資源の収集範囲が比較的狭く、輸送コストを低く抑えることができる。そのため、地域に広く薄く分布する森林バイオマス資源をエネルギー利用する技術として、今後の実用化および普及が期待されている。

そこで本研究では、森林バイオマスを燃料とした小規模ガス化発電に焦点を当てる。筆者らは、対象地域における資源分布と対象技術の技術特性にもとづいて、最適なプラント規模、立地地点、プラント数、および最小発電コストを解析するツール BiRReT (Biomass Economic Analysis Tool considering Regional Resource Distribution and Technical Characteristics such as Scale Merit) を、C++ 言語を用いて開発した。本稿では、まず解析ツールについて説明して、次に宮城県を対象として行ったケーススタディーの結果を報告する。ケーススタディーでは、森林バイオマスを主燃料とするエネルギーシステムを想定して、小規模ガス化技術と直接燃焼技術との経済性を比較した。また、温泉、公共施設、福祉施設などの業務部門を対象とする小規模ガス化熱電併給システムを想定して、経済性の観点から導入可能性の検討を行った。

2. 資源分布と技術特性を考慮した森林バイオマス発電経済性解析ツールの開発

2.1 ツールの概念設計

本ツールは、バイオマス資源の地域分布や発電技術のスケールメリットを考慮して、対象地域全体におけるバイオマス発電の経済性を解析する。解析手順を Fig. 1 に示す。発電プラントには、規模が大きくなると発電効率が向上して建設単価(JPY/kWe)も下がるというスケールメリットがある。一方で、プラント規模が大きくなると、大量のバイオマス燃料を広範囲から収集する必要が生じて資源輸送コストが高くなる。このトレードオフを考慮して、発電コストが最小となるプラント規模 (Optimal plant size) を算出する。次に、プラント周辺の資源分布によって輸送コストおよび発電コストが影

響を受けるために、発電コストが最小となるプラント立地地点 (Optimal plant location) を1ヶ所選択する。さらに、選択したプラントが消費する資源量を資源量データベース (Resource database) から除去した後、同じ計算を繰り返すことで、地域のバイオマス資源量をすべて有効活用する場合のプラント数を求める。解析結果として、各プラントの最適規模、最適立地地点、最小発電コストを出力する。

複数プラントの建設を同時に考慮する全体最適化ではなく、コストの低いプラントから順番に建てられていくという前提のもとで、プラントごとの最適条件を順に求めるツールである。

2.2 最適な発電プラント規模の計算

資源量データベースは、発生地点 (X_i, Y_i) 、資源量 Q_{ij} 、資源価格 P_{ij} 、資源の低位発熱量 LHV_{ij} の4種類のデータから成る。 i, j はそれぞれ資源発生地点番号と資源の種類を示し、1つの資源発生地点には複数の資源が存在し得るために、 Q, P, LHV は2次元配列となる。

ある立地候補地点 (suitable location) k において、発電コストが最小となるプラント規模を求める手順を説明する。スケールメリット関数 $Effic(Cap)$ および $SCC(Cap)$ (Fig. 2(a), (b)参照) は入力関数として与えられている。 $Effic(Cap)$ はプラント規模 Cap と発電効率 $Effic$ との関係を、 $SCC(Cap)$ はプラント規模 Cap と建設単価 SCC との関係を、それぞれ表す関数である。ここで、立地地点 k での平均燃料購入単価を示す関数を $AFP_k(Cap)$ (Fig. 2(d)参照) で示し、運転維持費 OM は一定と仮定すると、発電コストを表す関数 $GC_k(Cap)$ (Fig. 2(e)参照) は以下の式で示される。

$$GC_k(Cap) = \left(\frac{SCC(CAP)}{8760} \times CRF \times \frac{1}{AF} \right) + \frac{AFP_k(CAP)}{Effic(CAP)/100} + OM \quad (1)$$

CRF (capital recovery factor) は一般に投資回収係数と呼ばれ、ここでは割引率とプラントの寿命とを考慮して発電コスト中に占める建設単価分を求める係数である。 AF (availability factor) はプラントの稼働率である。本研究では、割引率を5%、プラント寿命を15年、稼働率を80%と設定した。

このとき、以下の条件を満たすプラント規模 Cap のとき、発電コスト GC_k は最小となる。

$$\frac{dGC_k}{dCap} = 0 \quad (2)$$

この条件を求めることによって、ある立地候補地点 k における最適プラント規模 $optCap_k$ および最小発電コスト $minGC_k$ を導出できる (Fig. 2(e)参照)。

式(1)右辺の関数の中で、平均燃料購入単価を示す関数 $AFP_k(Cap)$ のみが明らかになっていない。資源量データベースの情報をもとに $AFP_k(Cap)$ を導出する方法について述べる。はじめに、各資源発生地点 i から、立地候補地点 k までの距離 TD_{ik} を求める。ただし、直線距離に係数 α を乗じて道路走行距離とする。県内のランダムな2点を10組選択して直線および道路走行距離を計測した結果、 α は1.2～1.7であった。

Fig. 1 Calculation procedure of BiRReT tool

Subscriptions: i : ordering number for resource points
 j : resource types
 k : ordering number for suitable plant locations

Fig. 2 Conceptual figures of functions utilized to calculate optimal plant size

本研究では、 α を 1.5 と設定した。

$$TD_{ik} = \alpha \times \sqrt{(X_i - X_k)^2 + (Y_i - Y_k)^2} \quad (3)$$

輸送コスト関数 $TC(TD)$ が入力関数として与えられているので、地点 i で発生する種類 j の資源を地点 k まで輸送するときの燃料購入価格 $FP_{i,j,k}$ を計算することができる。

$$FP_{i,j,k} = P_{ij} + TC(TD_{ik}) \quad (4)$$

ここで、購入価格 $FP_{i,j,k}$ の低い燃料から順番に購入していくと考える。Fig. 2(c) は、購入価格 $FP_{i,j,k}$ の低い順番に資源を並べて、横軸を年間燃料消費量 $FC (= \sum (Q_{i,j} \times LHV_{i,j}))$ で示した概念図である。あるプラント規模 Cap における年間燃料消費量 FC は、

$$FC = \frac{Cap}{Effic(Cap)/100} \times 8760 \times AF \quad (5)$$

で示され、このときの合計燃料購入価格は Fig. 2(c) に示すように $\sum (FP_{i,j,k} \times Q_{i,j})$ (JPY/yr) となる。平均燃料購入単価 $AFP_k(Cap)$ は、合計燃料購入価格を年間燃料消費量で除して得られる (Fig. 2(d) 参照)。

$$AFP_k(Cap) = \frac{\sum (FP_{i,j,k} \times Q_{i,j})}{FC} \quad (6)$$

以上から、ある立地候補地点 k における平均燃料購入単価を示す関数 $AFP_k(Cap)$ が導出されるので、(1)、(2) 式から最適プラント規模 $optCap_k$ を算出できる。

2.3 最適な発電プラント立地地点の選択

上記の手順で、すべての立地候補地点に対して最適プラント規模を求める。ここで、発電コストを最小とする最適規模

は $optCap_k$, そのときの発電コストは $minGC_k$ である (ただし, $k = 0, 1, 2, \dots, n$). 次に, すべての立地候補地点 $k = 0, 1, 2, \dots, n$ の中から, $minGC_k$ が最小である地点 k^* を選択する。

$$minGC_k = \min_{k=0,1,2,\dots,n} \{minGC_k\} \quad (7)$$

以上から, 発電コストが最小となる最適プラント規模 $optCap_{k^*}$, 最適立地地点 $(X, Y) = (X_{k^*}, Y_{k^*})$, 最小発電コスト $minGC_{k^*}$ が求まる。

3. 入力データとケース設定

本節では, 宮城県を対象にしたケーススタディーの入力データおよびケース設定について述べる。

3.1 宮城県の資源量データベース

まず, 宮城県面積に対して, $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 粗さのメッシュを作成した。次に, バイオマス資源賦存量の調査報告書や森林地図など各種文献^{5) 6)} を参照して, それぞれのメッシュにおける林地残材 (Logging residue) および未利用間伐材 (Thinned wood) の資源発生量を推計した。さらに, おが屑・カンナ屑 (Sawdust) や端材 (Cutting edge) などの未利用製材残材も考慮して⁵⁾, 資源量データベースを作成した。Table 1に, データベースの合計値である県内年間発生量を示す。資源の発熱量は含水率に影響されるため, 想定した含水率も示す。

資源分布について概略を次に記す。資源発生量 (wet-t/yr) を森林面積 (ha) で除して得られる値を資源発生密度 (wet-t/yr/ha) とすると, 森林バイオマスの県内平均値は 0.23 wet-t/yr/ha と推計された。林業が盛んな登米町, 元吉町, 東和町の地域ではそれぞれ $0.99, 0.62, 0.51\text{ wet-t/yr/ha}$ と高い値となったが, その他の地域では $0.14 \sim 0.34$ と平均値に近い発生密度である。

未利用製材残材については, 地点 (52, 58), (30, 28), (23, 12) (地点番号と宮城県地図との対応は, Fig. 5, Fig. 6を参照) にある製材所でそれぞれ $1680, 805, 240\text{ wet-ton/yr}$ の発生量があり, 3製材所のみで県内全発生量の35%を占める。発生量 $50 \sim 200\text{ wet-ton/yr}$ の製材所が18カ所あり19%を占めていて, 残りの46%は発生量 50 wet-ton/yr 以下の製材所149ヶ所で占められている。

また, 森林, 水田地帯以外で人家や学校などの存在が確認できる地点はプラント建設が可能であると仮定して, プラント立地候補地点 (suitable locations for energy plant) とした。

3.2 スケールメリット関数

NEDOや欧州委員会の報告書など^{1) 7) ~10)} を参照して, 日本及びEUにおける既存のプラントデータをグラフにプロットし, 近似曲線を求めた (Fig. 3)。同じ施設規模であっても, 燃料の特徴, プラントの立地地点, 熱利用の有無, などのさまざまな条件によって, 発電効率や建設単価が変わると考えられる。しかしFig. 3では, 直接燃焼発電, 小規模ガス化発電のいずれの場合でも, 全般に規模が大きくなるほど効率が上がり, 建設単価が低減するというスケールメリットが確認できた。

小規模ガス化発電の運転維持費を算出すると, 約 $3.5 \sim 22\text{ JPY/kWh}$ とプロジェクトごとに大きな幅が見られた。プラントの多くは実証段階であり, 商用炉運転維持に要する費用の実データが得られていないためと考えられる。直接燃焼発電のデータ¹¹⁾ も参照して, 本研究では運転維持費を 6 JPY/kWh と設定した。

3.3 輸送コスト関数

バイオマス資源輸送コストの算出では, 林業作業で一般的

(a) Power generation efficiency

(b) Specific capital cost

Fig. 3 Scale merit functions

Table 1 The amount and moisture contents of resources

		Amount ^{5) 6)}	Moisture contents
		wet-t/yr	%
Sawmill waste	Sawdust	4,050	30
	Cutting edge	3,656	30
Forest biomass	Logging residue	47,806	50
	Thinned wood	48,940	50

Fig. 4 Transportation cost of wood chip by 4ton truck ^{12) ~ 14)}

に使われている4トントラックの使用を仮定した。文献¹²⁾ ¹³⁾では素材(丸太)輸送時のコストが示されているが、本研究ではチップ状(またはバンドリングされた状態)を想定しているため、素材とチップのかさ比重の差¹⁴⁾を考慮して、輸送コスト関数 $TC(TD)$ を算出した (Fig. 4)。関数の設定では、トラックの積み込み、荷降ろし作業に要するコストも考慮している。

3.4 ケース設定

本研究では、プラント建設単価SCCとバイオマス資源価格に対して、それぞれケース設定を行う。

プラント建設単価SCCに対するケース設定をTable 2とFig. 3(b)に示す。直接燃焼発電のSCC関数を図中のComb.で示す。

小規模ガス化発電のSCC関数は、現状がGasif. 1で表わされ、建設単価が今後低減していく場合を想定してGasif. 2~4を設定した。

- ・ Comb. ケース：既存の直接燃焼発電プラントのデータから近似した曲線である。
- ・ Gasif. 1 ケース：既存のガス化発電プラント(実証段階)のデータから近似した曲線である。
- ・ Gasif. 2 ケース：ガス化技術が実用段階に入るケースである。既存のガス化発電プラントは実証段階であるため、データのばらつきが大きい。実証試験が終わって商用炉の導入が始まるときには、比較的低い値に落ち着くものと想定して、Gasif. 2の関数を設定する。
- ・ Gasif. 3 ケース：Gasif. 2とGasif. 4との中間値である。
- ・ Gasif. 4 ケース：北欧のプラントと同程度まで建設単価が低減するケースである。木質バイオマスの先進地域である北欧諸国では、建設単価が非常に安価な例が報告されている(図中の“Gasif.-EU”参照)。わが国でも、今後の技術習熟によって同程度までの低減が可能となる場合を想定して、Gasif. 4を設定した。

ガス化発電では、温泉、公共施設、福祉施設など業務部門への熱電併給システム導入を想定しているため、出力は数100kWe以下が適切と考えられる。解析では、ガス化発電の出力上限として300kWeを設けた。

次に、バイオマス資源価格のケース設定をTable 3に示す。

Table 2 Case setting for specific capital cost

Case	Power generation technology	Capacity limit	SCC function
Comb.	Combustion (Stoker or Fluidized-bed) + steam turbine	no limitation	
Gasif. 1			See Fig. 3 (b)
Gasif. 2	Small-scale gasification + gas engine/gas turbine	300kWe	
Gasif. 3			
Gasif. 4			

Table 3 Case setting for forest biomass price ^{14) ~ 17)}

Case	Process	Cost to produce forest biomass fuels, JPY/dry-t			
		Sawdust	Cutting edge	Logging residue	Thinned wood
BAU	Whole-tree yarding				9,000
	Chipping in a forest			10,000	10,000
	Forwarder hauling			4,000	4,000
	Chipping at the plant		3,300		
	Total	0	3,300	14,000	23,000
Low 1	Whole-tree yarding				9,000
	Chipping in a forest			8,000	8,000
	Chipping at the plant		3,300		
	Total	0	3,300	8,000	17,000
Low 2	Whole-tree yarding				9,000
	Bandling			3,200	3,200
	Chipping at the plant		1,400	1,400	1,400
	Total	0	1,400	4,600	13,600

現状のBAU (Business as usual) ケースから、新方式導入や技術習熟によって資源価格が低減することを想定して、Low 1 ケース、Low 2 ケースを設定した。

・BAU ケース：まず文献^{14)~17)}を参考にして、国内林業の現状を考慮した代表的な値をBAUケースとする。林地残材の価格設定では、全木集材、プロセッサ造材により林内の先山土場に発生した枝条・末木を、移動式チップパーでチップ化して、そのチップをフォワーダで林道端土場まで運搬し、その後発電施設までトラック輸送するシステムを想定する^{15) 17)}。未利用間伐材の価格設定では、高性能林業機械を用いた列状間伐方式の作業を想定する¹⁶⁾。ただし、Table 1 に示す資源量は、切捨て間伐の実績値をもとに算出しているため、チェーンソー伐木コストは含まず、集材コストのみを考慮する。集材後のチップ化コストは、林地残材と同様である。次に製材残材については、おが屑はそのままエネルギー利用が可能な形状であるため0 JPY/dry-t とした。端材はエネルギー施設でのチップ化を想定して価格設定した¹⁶⁾。

・Low 1 ケース：フォワーダ運搬コスト分が削減されるケースである。価格設定では、作業路の道幅が十分広く4トントラックの走行も可能となる場合、または林道端でプロセッサ造材を行う作業システムの場合を想定した。これらの場合は、フォワーダによる林道端までのチップ運搬コストを削減できると考える。また移動式チップパーの作業効率向上も考慮に入れる¹⁷⁾。

・Low 2 ケース：新方式導入等により、さらにコストが低減するケースである。価格設定では、ヨーロッパで導入されているバンドリング技術が国内林業にも適用可能となる場合¹⁵⁾、または国内林業に適した類似技術が開発される場合を想定した。またエネルギー変換施設でのチップ化の作業効率向上も考慮に入れる¹⁵⁾。

以上、文献を参照して3ケースの価格設定を行ったが、実際の林業作業コストは、路網の整備状況、地形条件、作業システムなどの作業現場ごとの条件に大きく影響される。全般的には、習熟曲線を用いた北欧諸国での先行研究で報告されているように¹⁸⁾、森林バイオマス燃料の利活用が進むにつれて、新方式導入や技術習熟によって徐々にコストが低減すると考えられる。

4. 解析結果：宮城県を対象としたケーススタディー

4.1 最適プラント規模、立地地点、プラント数、および最小発電コストの算出

ツールを用いて、最適なプラント規模、立地地点、プラント数、および最小発電コストを解析した。直接燃焼発電Comb. ケースの結果をFig. 5に、小規模ガス化発電Gasif. 1 ケースの結果をFig. 6に、それぞれ示す。ただし、バイオマス資源価格はBAUケースである。Comb. ケースでは、5,500kWおよび1,200kWという比較的大規模なプラントが選択されて、2基だけで宮城県内のすべての資源量を利用する結果となった。これは、Fig. 3に示すように、数100kW程度の小規模では発

Fig. 5 Optimal plant locations (Comb. case & BAU case)

Fig. 6 Optimal plant locations (Gasif. 1 case & BAU case)

電効率が10%以下と著しく低く、発電コストが高くなるからである。Gasif. 1 ケースでは、小規模のプラント27基で、県内の資源をすべてエネルギー利用する結果となった。製材残材を主燃料とするプラント(△)は、資源発生地点である製材所周辺に立地している。一方で、森林バイオマスを主燃料とするプラント(○)は、周辺が森林に囲まれている山間部に立地している。

Fig. 7には、Fig. 6に示す全27基のプラントの発電コストとその内訳を、横軸に累積発電容量をとって示す。横軸では、1基目のプラントが左から始まり、27基目のプラントが右端に示されている。資源コスト(Resource)が階段状に上がり、それに合わせて発電コスト(Total)も階段状に上昇している。まず最も価格の安い製材残材を利用したプラントが選択され、その資源量が少なくなると、次は林地残材が選択され始め、その次は未利用間伐材、と選択されていく。

Fig. 7 Power generation cost of all 27 plants (Gasif. 1 case & BAU case)

4.2 小規模ガス化発電と直接燃焼発電との経済性比較

次に、ツール解析で得られた結果をもとに、小規模ガス化発電と直接燃焼発電との経済性比較を行う。バイオマス資源価格はBAUケースとする。Comb.ケース、Gasif. 1～Gasif. 4ケースにおける、全プラントの平均発電コスト(加重平均)とその内訳をFig. 8に示す。ここで、熱利用が可能な場合には重油購入費削減分を発電コストの低減に反映できると想定して、図中にマイナスで示し(図中“Heat”), 熱によるコスト回収も含めた総合コストも示した(図中“Net”)。ただし総合効率を70%と仮定して、総合効率から発電効率を減じた分を熱利用効率とした。Comb.ケースとGasif. 1ケースでは、特に輸送コストとプラント建設費に大きな違いがある。Comb.ケースでは発電容量が大きく建設単価が低い反面、大量の資源を広範囲から集める必要があるために輸送コストが15.6 JPY/kWhと大きくなっている。一方Gasif. 1ケースでは、建設単価は高いものの、小規模システムであるために輸送コストが6.1 JPY/kWhと低い。また、直接燃焼発電の出力は数千kWeと大規模であり、この規模に合う熱需要は、通常合板工場や製材工場などに限られている。一方小規模ガス化発電では300kWe以下の発電容量を想定していて、温泉や福祉施設など業務部門での熱電併給システム導入が可能と考えられるため、熱利用が比較的容易である。そのため、図中の“Heat”

Fig. 8 The comparison of generation cost (Biomass price BAU case)

分の事業採算向上が期待できる。さらに、小規模ガス化発電の建設単価が今後低減していく場合(Gasif. 2～Gasif. 4ケース)には、直接燃焼発電に比べて大幅に有利になる。

4.3 小規模ガス化熱電併給システムの導入可能性

最後に、経済性の観点から小規模ガス化熱電併給システムの導入可能性を検討する。ここでは、電力の売電単価を4～40 JPY/kWhまで変化させて、パラメータサーベイを行った。発電コストが売電単価よりも低ければ、プラントの事業化が可能であると仮定して、縦軸には事業化に伴う導入設備容量を示した(Fig. 9)。ただし、熱利用による重油購入費削減分を発電コストの低減に反映できるとする。Fig. 9(a)のGasif. 4ケースを見ると、売電単価が4～20 JPY/kWhの時は製材残材(Sawmill waste)を主燃料とするシステムしか導入されない。売電単価が約20 JPY/kWhを超える場合には林地残材(Logging residue)を主燃料とするシステムが導入され、約28 JPY/kWhを超える場合には未利用間伐材(Thinned wood)を主燃料とするシステムが導入される。

システム導入の対象施設である温泉や公共施設における電力購入単価を15 JPY/kWh前後と想定して、図中に帯状の色をつけて示した。この価格帯を見ると、森林バイオマス価格BAUケースでは、Gasif. 1～Gasif. 4ケースのいずれの場合でも製材残材を主燃料とするシステムの導入しか見込まれない。

*1 Approximate electricity selling price to a commercial sector such as hot spring and welfare facilities

Fig. 9 Total capacity of introduced small-scale gasification system, assuming that the system can be introduced if the generation cost is less than the electricity selling price

次に、Low 1 ケースおよび Low 2 ケースを見ると (Fig. 9 (b) 参照), 林地残材を主燃料とするシステムの導入可能性が見込まれる。Low 1 ケースではプラント建設単価が Gasif. 4 ケースの場合のみだが、Low 2 ケースでは Gasif. 3 ケースまたは Gasif. 4 ケースの場合に導入可能性がある。そのときの導入設備容量は約 4 MWe に達し、これが稼動した場合には、県内の業務部門エネルギー消費量 (2000) ¹⁹⁾ の約 1.3% に相当するエネルギー供給が可能となる。これは、県内の業務部門 CO₂ 排出量 (2000) ²⁰⁾ の約 1.3% の削減に相当する。ただし CO₂ 排出量の算出では、システム導入に伴う系統電力消費と重油消費の削減量、およびバイオマス資源輸送に伴う排出量を考慮した。

間伐材を主燃料とするシステムは、どのケースでも導入が見込まれない。森林バイオマスの利活用促進には、マテリアル利用とエネルギー利用の 2 つのアプローチがある。一般的には木材として使える部分はマテリアル利用をして、それが不可能な残材や廃材をエネルギー利用するという、カスケード利用が望まれている。解析の結果、マテリアルとしての利用可能性もある材を、コストを費やして集材しエネルギー利用することは、経済的な観点からも不利であることがわかった。森林バイオマスのエネルギー利用では、素材生産に伴って発生する林地残材の利用が主流になるものと考えられる。

5. 考 察

本研究では、高性能機械化を前提とした全木集材や列状間伐を想定して森林バイオマスを価格設定しているが、このような林業システムを県内で導入しているのは 1 森林組合だけである。森林バイオマスを主燃料とするエネルギーシステム実現のためには、こうした林業サイドでの合理化が進むこと、また作業方法の選択にあたってエネルギー利用も想定に入れた総合システムを構築することが必要になると考えられる。

筆者らが現地視察を行った県内の森林組合では、高性能林業機械が導入されていて、また路網の整備が進んでいるためにトラックが林内の土場まで走行可能な状態であった。これは Low 1 ケースに相当するため、林地残材を主燃料とするシステム導入の可能性がある。つまり、現状でも導入可能性が見込まれる地域は存在していて、現実的にはこれらの先進地域からシステムの導入が進んでいくと考えられる。先進地域で得られた知見や技術習熟が他地域へも波及することで、さらなるシステムの導入が期待できる。

RPS 制度やグリーン電力証書システムの活用が可能な場合には、通常の電力販売に加えて再生可能エネルギーの環境価値も販売できるため、事業採算が向上する。システム導入に対する強い価格インセンティブ付与が可能であるために、本研究で考慮したオンサイトエネルギー供給タイプの事業に対するこれら制度の充実が望まれる。

実際のシステム導入に際しては、電力や熱の需要変動を考慮した最適システム設計を行う必要がある。蓄電、蓄熱による負荷平準化システム、系統電力や灯油・重油ボイラーによるバックアップ、生成ガス貯蔵による負荷追従性の向上など、需要家の特性に応じてさまざまな可能性が考えられる。

本研究では業務部門への熱電併給システム導入を想定したが、森林バイオマス発電には、自然エネルギーの間欠性を補えるという特徴がある。小規模ガス化発電を導入することで、風力発電や太陽光発電の間欠性を補完する総合自然エネルギーシステム ²¹⁾ を設計できる。

林業分野では、森林 GIS を用いて、立木の資源量、地形条件、路網整備状況などから資源発生量、収穫コスト、収穫計画の解析を詳細に行う先行研究 ²²⁾ が報告されている。本研究では林業作業の実績値から資源発生量を求めたが、このような手法を用いることで、資源の発生量等をより詳細に扱うことができる。

資源分布とスケールメリットという特性は、木質系だけでなくすべてのバイオマスに共通する。そのため、さまざまなバイオマス資源へのツールの応用が可能と考える。

6. まとめ

地域における資源分布と対象技術の技術特性を考慮して、最適なプラント規模、立地地点、プラント数、および最小発電コストを解析するツール BiRReT を開発した。宮城県の森林バイオマス資源と未利用製材残材を対象として、ツールを用いたケーススタディーを行った。解析の結果、以下のことが明らかになった。

- ・直接燃焼技術を用いた場合は、プラント規模が大きくなって広範囲からの資源収集が必要であるために、発電コストに占める輸送コスト分が平均 15.6 JPY/kWh と高くなる。
- ・小規模ガス化発電技術は現在実証段階にあるが、森林バイオマスの利活用技術、CO₂ 排出量削減技術として、直接燃焼技術に比べて経済的に有利である。
- ・プラント建設単価または資源価格が低減する場合、全木集材から発生する林地残材を燃料とした小規模ガス化熱電併給システムの発電コストは約 15 JPY/kWh 以下となり、温泉、公共施設など業務部門への導入が見込まれる。
- ・県内の未利用製材残材と林地残材がすべて小規模ガス化システムで燃料利用された場合、合計設備容量は約 4 MWe となり、県内の業務部門エネルギー消費量 (2000) の約 1.3% に相当するエネルギー供給が可能となる。このとき、県内の業務部門 CO₂ 排出量 (2000) の約 1.3% に相当する削減量が得られる。
- ・未利用間伐材のエネルギー利用は経済的に困難であり、マテリアル利用を中心としたカスケード的な資源利活用が重要と考えられる。

謝 辞

宮城県産業経済部、登米地方振興事務所、宮城県環境生活部、株式会社森のエネルギー研究所からは、研究遂行にあたって大変有意義なご意見、ご助言をいただきました。関係各位へ、心より謝意を表します。

文 献 : References

- 1) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), バ

- イオマスエネルギー導入ガイドブック(第2版), p. 51-60 (2005): New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Guidebook for the implementation of Biomass Energy (second edition), p. 51-60 (2005)
- 2) (株)循環社会研究所, 平成16年度宮城県業務委託地域リサイクルエネルギー資源利用促進事業業務報告書, p. 93-96 (2005): Institute for Reflexive Community (inReC), Report on the promotion of recycling energy in local area in Miyagi prefecture, p. 93-96 (2005)
- 3) 東北地方建設副産物対策連絡協議会, 平成14年度建設副産物実態調査結果, (2004): Council of construction by-products treatment in Tohoku region, Report on the current situation of construction by-products, (2004)
- 4) 三菱総合研究所, 平成14年度新エネルギー等導入促進基礎調査バイオマスエネルギー開発・利用戦略に関する調査研究報告書, p. 7-9 (2002): Mitsubishi Research Institute, Inc., The report on the development and strategy of biomass energy, The fundamental research on dissemination of renewable energy 2002, p. 7-9 (2002)
- 5) エコ・アシスト, 平成15年度宮城県業務委託バイオマス資源賦存量調査報告書, p. 91-116 (2004): Eco-assist Co, Ltd., Research on the available quantity of biomass resources in Miyagi prefecture, p. 91-116 (2004)
- 6) 宮城県産業経済部森林整備課, 緊急間伐5ヵ年対策計画・実績, (2005): Miyagi Prefectural Government Industry Department Forest Management Division, The plan and actual status of 5-year emergent thinning project, (2005)
- 7) VTT Processes, Small-scale biomass CHP technologies -- situation in Finland, Denmark and Sweden, OPET Report 12, (2004)
- 8) TEKES, GROWING POWER -- Renewable solutions by bioenergy technology from Finland (Second edition), (2004)
- 9) European commission, Best practice projects yearbook 1997-2000, (2002)
- 10) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), バイオマスエネルギー導入ガイドブック, p. 30-32 (2003): New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Guidebook for the implementation of Biomass Energy, p. 30-32 (2003)
- 11) 秋田県行政資料, 能代木質バイオマス発電施設の概要: Akita Prefecture, Overview of Noshiro wood biomass power station, http://www.pref.akita.jp/rinseika/info/148_6_1.htm (Access date: 2005/Jul./07)
- 12) 日本エネルギー学会, 平成14年度バイオマス・ニッポン総合戦略策定緊急調査報告書, p. 117 (2003): Japan Institute of Energy, Research followed by the establishment of Biomass Nippon Strategy, p. 117 (2003)
- 13) 澤口勇雄, 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究(第1報), (森林総研研報No. 372), p. 71, 72 (1996): Sawaguchi, I., Studies on Forest-Road Evaluation and Forest-Road Standards in Mountain Forests(I), (Bulletin of Forestry and Forest Products Research Institute No. 372), p. 71, 72 (1996)
- 14) 吉岡拓如, 東京大学博士論文, p. 55-60 (2003): Yoshioka, T., Doctoral thesis Tokyo University, p. 55-60 (2003)
- 15) 吉岡拓如, 平田悟史, 松村幸彦, 坂西欣也, 日エネ誌, **81**, 241-249 (2002): Yoshioka, T., Hirata, S., Matsumura, Y., Sakanishi, K., *J. Jpn. Inst. Energy*, **81**, 241-249 (2002)
- 16) 立川史郎, 機械化林業, **596**, p. 1-4 (2003): Tatsukawa, S., *Kikaika Ringyo*, **596**, p. 1-4 (2003)
- 17) Yoshioka, T., Aruga, K., Nitami, T., Sakai, H., Kobayashi, H., *Biomass and Bioenergy*, in Press
- 18) Junginger, M., Faaij, A., Bjorheden, R., Turkenburg, W. C., *Biomass and Bioenergy*, **29**, 339-418 (2005)
- 19) 宮城県, 宮城県省エネルギービジョン, p. 44 (2005): Miyagi prefecture, The Vision for Energy Conservation in Miyagi, p. 44 (2005)
- 20) 宮城県, “脱・二酸化炭素” 連邦みやぎ推進計画, p. 16 (2004): Miyagi prefecture, The plan to reduce CO₂ emission in Miyagi, p. 16 (2004)
- 21) Nakata, T., Kubo, K., Lamont, A., *Energy Policy*, **33**, 209-219 (2005)
- 22) 有賀一広, 吉岡拓如, 櫻井倫, 森林利用学会誌, **21** (2006), in Press: Aruga, K., Yoshioka, T., Sakurai, R., *Journal of the Japan Forest Engineering Society*, **21** (2006), in Press

Nomenclature

AF	Availability factor
AFP(Cap)	Average fuel price (JPY/kWh)
CRF	Capital recovery factor
Effic(Cap)	Power generation efficiency (%)
FC	Annual fuel consumption (kWh/yr)
GC(Cap)	Generation cost (JPY/kWh)
FP	Individual fuel price (JPY/wet-t)
Cap	Plant capacity (kWe)
LHV	Lower heating value (kWh/wet-t)
minGC	Minimum generation cost (JPY/kWh)
OM	Operation & maintenance cost (JPY/kWh)
optCap	Optimal plant capacity (kWe)
P	Price of resource (JPY/wet-t)
Q	Quantity of resource (wet-t/yr)
SCC(Cap)	Specific capital cost (JPY/kWe)
TC(TD)	Transport cost (JPY/wet-t)
TD	Transport distance (km)
X	X coordinate in a map
Y	Y coordinate in a map
i	Ordering number for each mesh in a resource database

- j Ordering number for resource types
 k Ordering number for each mesh in a suitable location database
-