

集落の未来社会を想定した エネルギーシステムの検討 —日本版バイオマスビレッジの提案—

河野 恵里子¹・島田 克也²・石井 一英³・八村 幸一⁴・藤山 淳史⁵・古市 徹⁶

¹非会員 いであ (株) (〒224-0025 横浜市都筑区早渕2-2-2)

E-mail:eriko@ideacon.co.jp

²正会員 いであ (株) (〒224-0025 横浜市都筑区早渕2-2-2)

E-mail:simada@ideacon.co.jp

³正会員 北海道大学大学院工学研究院・工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail:k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 鹿島建設 (株) (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

⁵正会員 北九州市立大学環境技術研究所 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

⁶正会員 北海道大学大学院工学研究院・工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

未来社会における集落では、現在よりも小規模分散型エネルギーシステムの構築が強く望まれると想定する。そこで本研究では、100%バイオマスを用いたエネルギーの地産地消を行う集落群であるバイオマスビレッジを提案する。そのためにまず、集落1単位(30人、15世帯、酪農家、農家含む)で発生するふん尿、稲わら、木質バイオマスを用いたエネルギー供給システムを検討した。次に事業採算性を考慮したバイオマス施設の組合せを考え、それを最小規模のバイオマスビレッジとして、必要なバイオマス資源量、施設規模、居住面積等を求めた。その結果、牛1,000頭(飼養面積13 km²)木質ペレット900 t(森林面積27 km²)のバイオマスによる、260人分の居住者(住居エリア6.5 km²)のバイオマスビレッジを提案した。

Key Words : biomass village, methane fermentation, woody pellet, energy systems, future society

1. はじめに

10年後以降の未来社会における集落では、人口減少による過疎化や社会資本整備の規模縮小等により、今までと同様な社会システムでは、集落の活力が今よりも低下・衰退していくことが想定される。特に、現在のよう化石燃料の大量消費や電力重視型エネルギー大量消費社会における大規模集中型エネルギーシステムの場合、エネルギー利用効率の低さ、送配電に伴うエネルギー損失の高さ等、化石燃料が高騰した場合に集落でのエネルギー供給に制約が生じる可能性が高い。そのため、集落において必要なエネルギーを独自に生産・消費する地産地消型自立エネルギーシステムの構築を検討する必要がある。また、国内のエネルギー消費の60%は熱エネルギーであることから、電力を用いた冷暖房は非効率であると考えられる。そこで本研究では、集落内で発生するバイオマスを用いて集落で必要とするエネルギーの供給を行うことを目的とし、その際のエネルギーシステムの検討

を以下の手順で行った。1. 集落1単位における需要エネルギー及びバイオマスによる供給可能エネルギーの整理、2. 集落1単位で発生するバイオマスを用いたバイオマス単体及び組合せによるエネルギー供給システムの検討、3. 100%バイオマスを用いたエネルギーの地産地消を行う集落群であるバイオマスビレッジを想定したエネルギー供給システムの検討(事業採算性を考慮した施設規模、バイオマス資源量並びにそのために必要となる家畜飼育量及び森林面積量、居住エリア面積)を行った。

ここでの集落は、バイオマス量の豊富な北海道を対象とし、人口については北海道の集落で最も割合の高い30人と設定した。更に1集落の世帯数は、北海道の世帯平均人数2.3人より、15世帯と設定した。また、対象とするバイオマス種は、家畜ふん尿・稲わら・木質とし、家畜ふん尿はメタン発酵からメタンガスを生成、稲わら・木質はペレットやチップに成形し、それぞれの燃焼によりエネルギーを得るものとした。さらに、集落には酪農施設が必ず存在するものと設定した。

2. 集落における需要エネルギー及びバイオマスによる供給可能エネルギー

(1) 集落における需要エネルギー

集落における需要エネルギー（電力及び熱）は、居住者の日常生活に係るエネルギー、酪農に係るエネルギー及びメタン発酵槽の加温エネルギーとした。

1集落（15世帯30人）における日常生活に必要な年間エネルギー量を表-1に示す。エネルギー種は、熱エネルギーと電力とし、電力需要及び熱需要ともに寒冷地の値とした。これより暖房、給湯及び厨房に係る熱エネルギーは約807 GJ/年、電力は約42,070 kWh/年となった。また、灯油料金への換算は灯油の単位発熱量を44 GJ/tとして64円/L（平成28年8月3日値）で求めた⁷⁾。電気料金への換算は北海道の一般的な電気料金の計算方法（基本料金、電力使用量ごとの3段階の料金設定、再生可能エネルギー発電促進賦課金の合計）により行った。

酪農に係るエネルギー需要量を表-2に示す。エネルギー種は、熱エネルギーと電力とし、牛舎の暖房は、家畜暖房用ヒーターを用いて、1機あたり1日300 Wh²⁾×24hで5機使用と想定し、7か月（10月～4月）使用した場合のエネルギー量とした。各値は端数を四捨五入としたため、合計値と同値とはならない。これより1舎100頭規模の酪農施設のエネルギー需要は、熱エネルギー27 GJ/年、電力30,000 kWh/年となった。また、灯油への換算は、

表-1と同様とし、電気料金は一般家庭とは異なるので、1 kWh 30円で計算（北海道電力平均単価）し、基本料金等は含まないこととした。

メタン発酵槽は発酵時に施設を一定温度に保つ必要がある。メタン発酵槽の加温に係るエネルギー量を表-3に示す。加温熱量は生ごみメタン発酵施設の事例値を参考とし、約0.23 GJ/(t・年)とした。

(2) バイオマスによる供給可能エネルギー

集落で発生するバイオマスを家畜ふん尿・稲わらペレット・木質ペレットとした場合の各供給可能エネルギー量を表-4に示す。電力のバイオガス発電施設の発電効率25%とした³⁾。農家1戸あたりの水稲作付面積は、北海道における1農業経営体あたりの経営耕地面積の平均8.6 haとした。稲わらペレット量は、全国5地域（栃木、茨木、千葉2地域及び長野）における1haあたりの稲わら収集量の平均4.4 t⁴⁾に、稲わら原料から稲わら製品となる際の重量変化（平均0.76倍⁵⁾）を考慮して求めた。また、木質ペレットの発電量は、木質の直接燃焼時に発電を行っている国内4施設の1 tあたりの発電出力量から平均を求め、さらに木質ペレットの発熱量については発電後の廃熱を利用する蒸気式タービンコジェネレーションシステム（CGS）と想定し、ボイラー燃焼時の発熱量を15.5 GJ/t、廃熱利用率を45%と設定した。

表-1 日常生活に係る需要エネルギー（15世帯30人集落）⁶⁾

エネルギー種	熱エネルギー (GJ/年)			電力 (kWh/年)		
	暖房	給湯	厨房	冷房	電灯	動力その他
エネルギー量	401	377	29	270	7,800	34,000
	807			42,070		
料金 (千円)	灯油 1,485			電気 1,350		

表-2 酪農に係る需要エネルギー（牛舎1舎100頭規模あたりの需要エネルギー）

エネルギー種	熱エネルギー (GJ/年)	電力 (kWh/年)				
	暖房エネルギー	ミルク・真空装置	バルククーラー	送風機	バンクリーナー	照明
エネルギー量	27	7,300	14,000	6,300	530	1,700
	27	30,000				
料金 (千円)	灯油 50	電気 909				

表-3 メタン発酵槽加温エネルギー

処理量 (t/年) ⁷⁾	10,600
メタンガス槽加温熱量 (GJ/年) ⁸⁾	2,470
処理量あたりの加温熱量 (GJ/(t・年))	0.23

表-4 バイオマス供給可能エネルギー

牛1頭あたりの家畜ふん尿	ふん尿量	19t/年 ⁹⁾
	メタンガス量	260Nm ³ /年 ¹⁰⁾
	発電電力量	810kWh/年 ¹⁰⁾
	発熱量	4.3 GJ/年 ¹⁰⁾
農家1戸あたり (8.6 ha) の稲わらペレット	稲わら発生量	30t/年 ⁴⁾¹¹⁾⁵⁾
	発熱量	440 GJ/年 ¹²⁾
木質ペレット	発電電力量	0.062 kWh/t ¹³⁾
	発熱量 (CGS)	7.0 GJ/t ¹⁴⁾
	発熱量 (ボイラー)	16 GJ/t ¹⁴⁾

3. 集落におけるバイオマス単体及び組合せによるエネルギー供給システムの検討

(1) 家畜ふん尿

家畜ふん尿を用いたエネルギー供給フローを図-1に示す。家畜ふん尿からのエネルギー供給は、家畜ふん尿をメタン発酵し、得られたメタンガスを燃焼して、電力と熱を生産するコジェネレーションシステムとする。北海道の平均飼養頭数約100頭/戸から発生するエネルギーで、1集落（15世帯30人）の需要エネルギーを賅うことが可能かどうかについて検討を行った。その結果、熱エネルギーは不足するが電力は十分であり、牛舎1舎を含めた必要電力72,000 kWh/年の供給が可能となった。また、余剰電力も約9,000 kWh/年発生する。

(2) 稲わらペレット

稲わらペレットを用いたエネルギー供給フローを図-2に示す。稲わらペレットからのエネルギー供給は、稲わらペレットをボイラーストープで燃焼して熱を生産するシステムである。稲わらペレットの燃焼による電力生産は、燃焼温度が低いと発電効率が低くなることから、電力は供給せずに熱エネルギー供給のみとした。北海道

の1農家における平均農地面積から発生する稲わらペレットによる熱エネルギーが、1集落（15世帯30人）の需要熱エネルギーを賅うことが可能かどうかについて検討を行った。その結果、1農家分では供給困難だが、2農家分の稲わらペレットであれば1集落に必要な熱エネルギー807 GJ/年の供給が可能となり、73 GJ/年の余剰熱も発生する。

(3) 木質ペレット

木質ペレットを用いたエネルギー供給フローを図-3に示す。木質ペレットからのエネルギー供給は、木質ペレットを燃焼し、蒸気タービン発電で電力と熱を生産するコジェネレーションシステムとする。1集落（15世帯30人）の需要エネルギーを賅うことが可能な木質ペレット量は約678千 t/年であり、それにより熱エネルギー807 GJ/年及び電力42,000 kWh/年の供給が可能となる（発電量は、「バイオマス利活用技術情報データベース」¹⁵⁾において木質の直接燃焼時に発電を行っている4施設の1tあたりの発電出力平均より求めた）。しかしながら、需要電力を賅うためには、大量の木質をエネルギーに変換しなければならない。

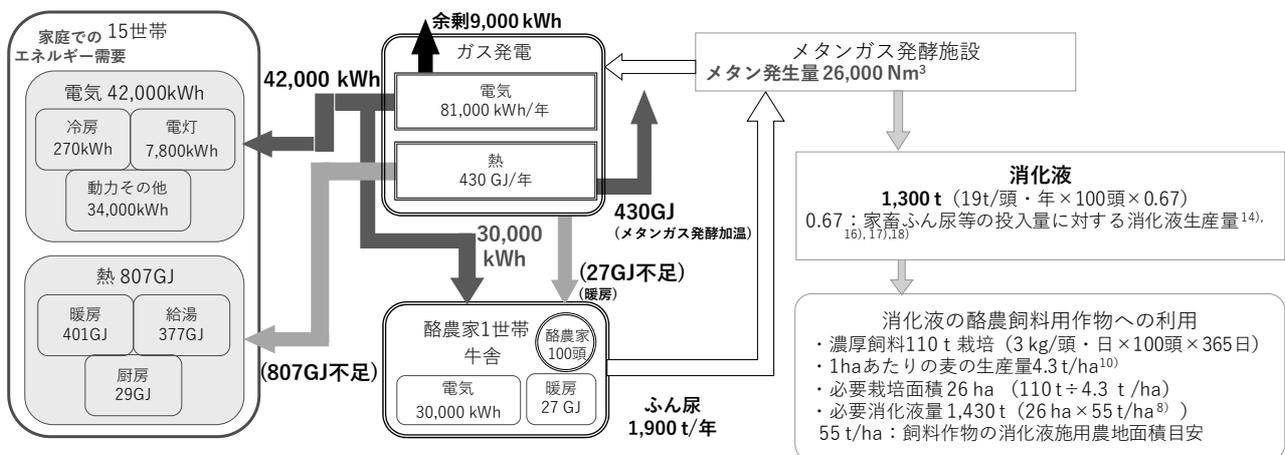


図-1 家畜ふん尿を用いたエネルギー供給フロー（コジェネレーション）

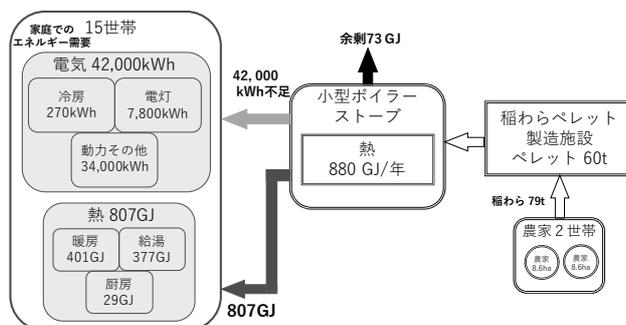


図-2 稲わらペレットを用いたエネルギー供給フロー（熱供給のみ）

また、4,745,000 GJ/年もの余剰熱が発生することから、余剰熱の利用先の検討が必要となる。また、ボイラーによる熱エネルギーのみの供給の場合、1集落の熱エネルギーを賄うことが可能な木質ペレット量は、51 t/年となる。熱エネルギー供給のみなので電力は不足する。

(4) バイオマスの組合せ

家畜ふん尿、稲わらペレット及び木質ペレットの各単体のバイオマスでは、1集落に必要な電力・熱をすべて賄うシステムが構築できなかったため、複数のバイオマスを組合せたエネルギーシステムを検討した。その結果、バイオマスの組合せは電力については家畜ふん尿を用い、熱エネルギーは木質ペレットのボイラーを用いる組合せが最も効率的なエネルギー供給となった。エネルギー供給フローを図-4に示す。酪農家1世帯が飼育する牛100頭からの家畜ふん尿と、51 tの木質ペレットから発生するエネルギーで、牛舎1舎及び1集落に必要な電力72,000 kW/年、牛舎1舎とメタン発酵槽加温及び1集落に必要な熱エネルギー1,264 GJ/年の供給が可能となる。また、余剰電力約9,000 kWh/年及び余剰熱9 GJ/年が発生する。これより、30人規模の集落にメタンガス発酵施設と木質ペレット製造施設の設置ができ、維持管理が経済的に可能であれば、家畜ふん尿と木質ペレットの組合せは、適用可能と考えられる。

4. バイオマスビレッジを想定したエネルギー供給システムの検討

(1) バイオマス変換施設の採算可能規模

集落で自立したエネルギーシステムを構築する際、集落ごとにバイオマスをエネルギーに変換する施設（バイオマス変換施設）を建設すると、施設規模が小規模のものを多数設置することになり、建設費及び維持管理費等経済面において大規模施設に比べて効率的ではない。そのため、バイオマス変換施設の採算可能規模（バイオマス量）を試算した。メタン発酵施設における採算可能な牛飼育頭数は、既存のメタン発酵施設の規模と発電量及び売電量の関係、並びに既存のメタン発酵施設の規模と維持管理費の関係から、維持管理費と売電収益が同額となる発電量及び施設規模飼育頭数とした。また、ペレット製造施設における採算可能なペレット生産量は、稲わらペレット及び木質ペレットが現在の灯油と価格的に同等（灯油価格67円/L）となる製造原価での生産量とした。その結果を表-5に示す。メタン発酵施設は牛1,000頭以上、ペレット製造施設は稲わらペレット生産量1,500 t/年以上、木質ペレット900 t/年以上となった。

表-5 バイオマス変換施設における採算可能なバイオマス量

バイオマス変換施設	バイオマス種	採算可能なバイオマス量
メタン発酵施設	家畜ふん尿	飼育頭数 牛1,000頭以上
ペレット製造施設	稲わらペレット	ペレット生産量 1,500t/年
	木質ペレット	ペレット生産量 900 t/年

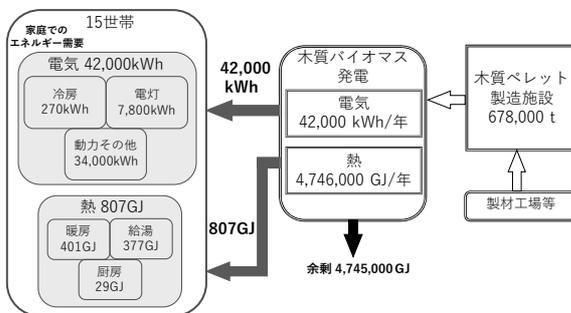


図-3 木質ペレットを用いたエネルギー供給フロー（コジェネレーション）

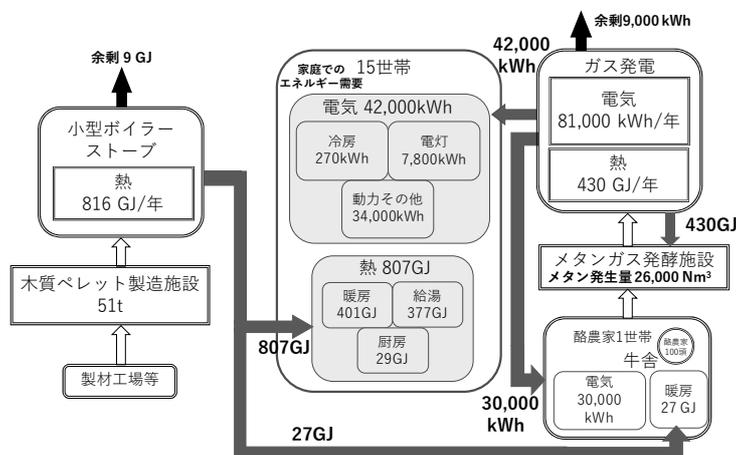


図-4 家畜ふん尿と木質ペレットを用いたエネルギー供給フロー（コジェネレーション）

(2) バイオマスビレッジにおけるエネルギーシステム

バイオマス変換施設における採算可能なバイオマス量の計算結果を用いて、100%バイオマスを用いたエネルギーの地産地消を行う集落群をバイオマスビレッジと定義し、バイオマスを複数種組合せたエネルギーシステムの検討を行った。検討結果を図-5に示す。バイオマス種の組合せは、30人規模の集落で最も効率的にエネルギーを供給する結果となった家畜ふん尿と木質ペレットとし、家畜ふん尿から電力を生産し、木質ペレットから熱エネルギーを生産することとした。検討対象地は全国の59%の乳用牛が飼養されており¹⁹⁾、林地残材の賦存量が全国で最も多い²⁰⁾北海道を対象とした。

牛1,000頭/日のふん尿から発生する電力は810,000 kWh/年であり、1舎100頭の牛舎10舎分の使用電力量300,000 kWh/年を差し引くと、510,000 kWh/年が居住地区へ供給可能な電力となる。15世帯の年間電力量は42,000 kWh/年であるが、電力使用量は季節によって異なり、一般的に2月が最も多くなる(年間電気使用量の11%)²¹⁾。そのため、電力の需要量及び供給量を月別に求め、電力使用量が最も多くなる月において供給可能な世帯数を求めた。なお、北海道の牛舎における電気使用量の季節変化はほとんどみられない²²⁾ため、変動しないとした。その結果、130世帯260人に供給可能となった。一方、ふん尿から発生した熱エネルギーはメタン発酵施設の加温に用いることから、居住者への供給は木質ペレットを用いることとした。木質ペレットの施設採算可能規模は900 tであるが、居住者需要エネルギー約7,000 GJ/年と牛舎10舎分のエネルギー270 GJ/年分の木質ペレットは455 tと約半分の量で賄える。そのため、残り445 t(7,100 GJ/年)についてはエネルギー販売が可能となる。また、複数のバイオマスビレッジで木質ペレット製造施設を共同利用することも考えられる。更に、電力使用量の最も多い月に130世帯260人分の電力を供給可能と

して設定しているため、5月から12月は11,000~16,000 kWhの余剰電力が生じることから、余剰分は売電可能である。一方、これらエネルギー生産に必要なバイオマスをバイオマスビレッジ内で確保し、エネルギーの地産地消が可能なシステムを構築するために必要な牛の飼養面積及び森林面積を求めた。牛の飼養面積は、北海道における飼養頭数及び経営面積より1.3 ha/頭²³⁾であることから、1,000頭あたりの飼養面積は1,300 ha(13km²)となった。森林面積は、[バイオマス必要量(900 t) × (生木含水率50%/バイオマス含水率10%)²⁴⁾ ÷ [単位面積当たりの森林蓄積量(195 m³/ha)²⁵⁾ ÷ 森林蓄積量の密度(1.26 m³/t)²⁴⁾ × 間伐材と主材の比率(1.25)²⁶⁾ × 樹木の伐採までの年数(70年)²⁶⁾より求め、2,600 ha(26 km²)となった。また、130世帯260人の居住面積は、北海道における乳牛飼養頭数の多い10自治体(別海町、士幌町、標茶町、清水町、中標津町、新得町、上士幌町、鹿追町、帯広市、大樹町)²⁷⁾の人口密度の平均40人/km²より、6.5 km²とした。更に居住者への熱エネルギーはボイラー施設から熱導管を用いて供給する場合、ボイラー施設からの熱供給可能範囲は3 km²程度²⁸⁾であることから、ボイラー施設は居住エリアに2箇所設置する。

5. おわりに

10年後以降の未来社会を想定し、人口減少により過疎化が進んだ酪農地域においてエネルギーの地産地消が100%可能なバイオマスビレッジをバイオマス量及び集落の規模の観点から検討した。今後は、本検討結果をふまえて、再生可能エネルギーなど他のエネルギー利用も含め、未来の酪農地域において持続可能なバランスのとれた社会の在り方について検討を進め、社会実装に繋げる必要がある

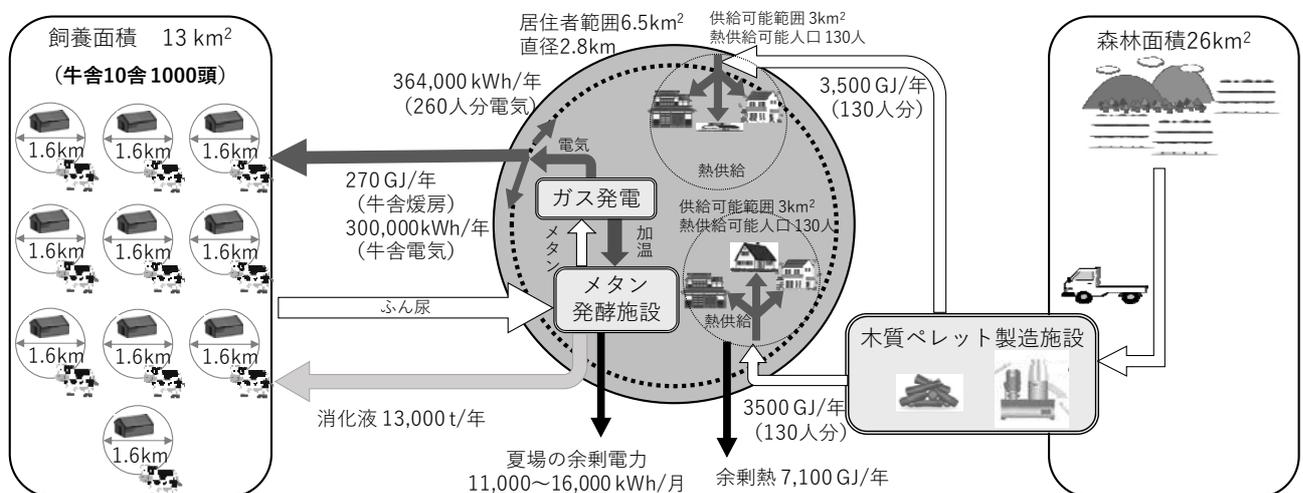


図-5 バイオマスビレッジにおけるバイオマス資源と居住エリアの面積

謝辞：本研究は北海道大学寄附分野「循環・エネルギー技術システム分野」における研究の一貫として行われた。

参考文献

- 1) 石油情報センター: 一般小売価格 給油所ガソリン・軽油・灯油 週次調査, 2016.
- 2) 家畜暖房用ヒーター:
<http://www.hakko.co.jp/qa/manual/b1-2010.pdf>
- 3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課: メタンガス化(生ごみメタン)施設整備マニュアル, 2008.
- 4) 佐賀 清崇, 芋生 憲司, 横山 伸也, 藤本 真司, 柳田 高志, 美濃輪 智朗: バイオエタノール生産に向けた稲わら等の収集運搬作業体系に関する研究, エネルギー・資源学会論文誌., Vol.29, No.6, 2008.
- 5) 友川 悠, 古市 徹, 石井 一英, 翁 御棋, 金 相烈: 南幌町の稲わらペレットの発熱量に影響を及ぼす因子の実プラントによる検討, 第40回環境システム研究論文発表会講演集, pp81-87, 2012.
- 6) 三菱総合研究所: 平成 24 年度エネルギー消費状況調査(民生部門エネルギー消費実態調査)報告書, 2013.
- 7) 井上 陽仁: メタン発酵を中心とした地域バイオマス利活用システムの評価, 北海道大学博士論文, 2013.
- 8) バイオマス産業社会ネットワーク第 94 回研究会: 地域のメタン発酵施設を成功させるポイント, 2009.
- 9) 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構: 家畜ふん尿処理利用の手引き 2004, 2004.
- 10) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課: 廃棄物系バイオマス利活用導入マニュアル(詳細版)(案), 2015.
- 11) 上出 光志, 古市 徹: 稲わらペレットの燃焼条件の最適化に向けた検討, 札幌市研究成果報告書, 2012.
- 12) 南幌町資料:
http://www.town.nanporo.hokkaido.jp/mpsdata/web/2472/023_shinchoku_H23.pdf
- 13) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課: 廃棄物系バイオマス利活用導入マニュアル(詳細版)(案), 2015.
- 14) 一般社団法人日本木質ペレット協会:
<https://w-pellet.org/pellet-2/1-6/>
- 15) 社団法人 地域環境資源センター: バイオマス利活用技術情報データベース ver.2.1.
- 16) 矢萩健太, 古市徹, 石井一英, 金相烈, 谷川昇: 南幌町稲わら熱利用システムの事業性評価のための影響要因の検討, 第38回環境システム研究論文発表会講演集, pp339-344, 2010.
- 17) 青森県 商工労働部 新産業創造課: 木質バイオマス燃料ビジネスモデル形成事業 木質ペレット委託調査, 2009.
- 18) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 農業研究本部 根釧農業試験場: 環境保全と良質粗飼料生産のための乳牛飼養可能頭数算定法, 2007.
- 19) 農林水産省: 畜産統計, 2018.
- 20) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構: バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計, 2011.
- 21) 総務省統計局: 電気使用量の推移, 2015.
- 22) 社団法人 中央畜産会: 平成 21 年度酪農経営における電力消費実態調査結果, 2009.
- 23) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構: 環境保全と良質粗飼料生産のための乳牛飼養可能頭数算定法, 2007.
- 24) 株式会社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, 2012.
- 25) 農林水産省: 森林・林業統計要覧, 2017.
- 26) 全国森林組合連合 H.P.:
<http://www.zenmori.org/kanbatsu/report/top.html>
- 27) 独立行政法人家畜改良センター: 牛個体識別情報, 2014.
- 28) 株式会社三菱総合研究所: 地方公共団体実行計画(区域施策編)策定マニュアルに関する低炭素化手法の検討業務報告書 第二部 都市・街区単位の対策・施策に関する検討, 2011.

(2018.8.24 受付)

ENERGY SYSTEMS IN FUTURE SOCIETY OF VILLAGES -PROPOSAL OF THE JAPANESE VERSION OF BIOMASS VILLAGE

Eriko KONO, Katsuya SHIMADA, Kazuei ISHII, Koichi HACHIMURA,
Atsushi FUJIYAMA and Toru FURUICHI

Since vigor of villages will gradually decrease/deteriorate in future society due to depopulation, degradation of social capital improvement, etc., Future villages will be requested to establish self-sustaining energy systems more strongly than at the present. Therefore, this study proposes a biomass village that is a group of settlements, where all necessary energy is supplied from only biomass produced in the village. For that, an energy supply system was built for one unit settlement (30 persons and 15 households including farmers), considering cow manure, rice straw and woody biomass. Next, multiple biomass energy supplying facilities was combined to define the smallest biomass village, considering the minimum capacity of each facility determined by financial feasibility. Based on that, this study attempted to determine the amount of biomass, the capacity of each facility, residential floor space, etc., that will be required. As a result, the smallest biomass village was proposed, where manure produced by 1,000 cows (feeding area: 13 km²) and 900 t of wood pellets (forest area: 27 km²) would be required as biomass to supply electric power and heat for 260 residents (residential area: 6.5 km²).