

離島におけるエネルギー輸送による経済・環境負荷と バイオマスエネルギー利用による負荷削減ポテンシャル

森 祐樹¹・町村 尚²・松井 孝典³

¹非会員 大阪大学大学院生 大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: yuki.mori@ge.see.eng.osaka-u.ac.jp

²非会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科

³会員 大阪大学助教 大学院工学研究科

日本は世界有数の多島国である。離島における主要な問題のひとつに、輸送による追加的なコスト発生や環境負荷の増大の問題がある。本研究は沖縄県の離島を対象とし、離島外から輸送されるエネルギー源を離島内のバイオマスエネルギーで代替した際の経済・環境負荷の削減ポテンシャルを評価した。離島での部門別最終エネルギー消費とエネルギー源別最終エネルギー消費とバイオマスエネルギー賦存量を推計し、輸送による経済・環境負荷に対してバイオマスエネルギー利用による負荷削減ポテンシャルを推計した。対象離島全体でのバイオマスエネルギー賦存量は3,058TJ/yrとなり、これは対象離島全体の最終エネルギー消費の27%に相当した。また項目別の構成は対象離島全体で農業系66%、畜産系23%、食品系9%、木質系1%、汚泥系0.6%となった。分析対象の離島全体で輸送コスト、輸送によるCO₂排出量負荷削減ポテンシャルは、現状に対してそれぞれ31%、12%という結果が得られた。

Key Words : Final energy consumption, Biomass energy, Transportation cost, remote islands
CO₂ emission

1. はじめに

(1) 研究の背景

日本は 6,847 の離島が存在する世界有数の多島国である。しかし、離島はその地理的条件や狭小性や経済活動の不平等性などに起因する問題を数多く抱えている。離島における問題のひとつに、輸送による追加的なコスト発生や環境負荷の増大の問題がある。離島におけるガソリン価格は、本土と比べて 1L あたり 20 円程度高いと言われている¹⁾。これは、流通コストが島の大きさや流通経路等離島の地政学上の理由により本土と比べて 7~15 円程度割高であること、販売量が本土のサービスステーションより少ないためサービスステーションのマージンが高いこと等が要因と考えられている。輸送による経済・環境負荷の低減を目指す、また生活を支える物資の安定供給を目指すうえでも離島内の資源自給率の向上が望まれる。

離島におけるエネルギー源について、更新性資源であるバイオマスをエネルギーとして利用することで輸送への依存を緩和でき、輸送による経済・環境負荷の削減が期待される。バイオマスエネルギーはカーボンニュートラルであるため、化石燃料を代替

することによって、地球温暖化防止対策の有効な手段の一つとされている。わが国のバイオマスエネルギー導入の動向として「バイオマス・ニッポン総合戦略」²⁾が挙げられる。ここでは温室効果ガス排出削減対策として、バイオマスタウン構築によるバイオマス利活用の推進やバイオマスエネルギーなどの新エネルギー導入の促進が図られている。

バイオマスエネルギーを含む再生可能エネルギーの地域的ポテンシャルを評価した先行研究として、倉阪ら³⁾は区域内の民生・農水用エネルギー需要を上回る量の再生可能エネルギーを生み出している市区町村について試算を行っている。この研究は、エネルギー源の観点から長期的な持続可能性が確保された区域を見える化する役割を担っているといえる。

(2) 本研究の目的

日本の離島の多くが第一次産業を基幹産業とすることから、離島におけるバイオマスのエネルギー利用はエネルギーセキュリティ、輸送コストの低廉化、CO₂ 排出抑制に対して有効であると考えられる。そこで本研究では、個々の離島ごとのエネルギー源別最終エネルギー消費とバイオマスエネルギー賦存量を把握し、バイオマスエネルギー利用による経済・環境負荷を評価することで各離島に応じたエネルギー施策を考察することを目的とする。

2. 分析方法

(1) ステップ1：対象離島の選択

沖縄県は日本の南西部に位置し、東西約1,000km、南北400kmの海域に散在する大小160の島々からなる全国でも有数の島嶼県であり、沖縄本島を除く39の有人離島に県人口の約10%を占める約133,000人が居住している。本研究では、沖縄県において人口1,000人以上の指定離島を対象に選択した。指定離島とは沖縄振興特別措置法第3条第3号、同法施行令第1条で「沖縄にある島のうち、沖縄島以外の島で宮古島、石垣島その他内閣総理大臣が関係行政機関の長に協議して指定した島とする」と定義される。

(2) ステップ2：最終エネルギー消費の推計

対象離島の部門別・エネルギー源別最終エネルギー消費を把握するため、都道府県別エネルギー消費統計のデータを基に推計を行った。対象離島ごとの最終エネルギー消費のデータが得られなかったため、沖縄県全体の最終エネルギー消費のデータ³⁾を使用した。対象離島ごとの部門別最終エネルギー消費を推計するために、沖縄県全体の2007年度部門別最終エネルギー消費のデータ⁴⁾を部門ごとに相関関係の強い活動指標を用いて、対象離島ごとに按分を行った。按分に用いる活動指標は、最終エネルギー消費との比例関係が強く、対象離島ごとのデータが得られるものが適当である。按分に用いる活動指標を市町村別エネルギー消費統計作成のためのガイドライン⁵⁾を参考に決定した。按分に用いた部門別最終エネルギー消費のデータは沖縄県全体のデータなので、沖縄県全体の活動指標に対して対象離島ごとのデータ^{6),7),9)}(表-1、表-2)で按分し、対象離島ごとの部門別最終エネルギー消費の推計を行った。

次に、対象離島ごとのエネルギー源別最終エネルギー消費を把握するために、各部門のエネルギー源

別最終エネルギー消費構成を2007年度総合エネルギー統計エネルギーバランス表¹⁰⁾(図-1)から推計した。ここで推計を行ったエネルギー源は石炭、石炭製品、ナフサ、ガソリン、ジェット燃料、灯油、軽油、重油、ガス、電力、その他の計11種である。推計した対象離島ごとの部門別最終エネルギー消費を、部門ごとに各部門のエネルギー源別最終エネルギー消費構成のデータを用いてエネルギー源別最終エネルギー消費へと按分を行った。そして、エネルギー源の輸送によるコスト・CO₂排出量を推計するために、対象離島ごとのエネルギー源別最終エネルギー消費をエネルギー源別標準発熱量¹¹⁾を用いて、エネルギー源別最終エネルギー消費を熱量単位から重量、容量、電力量単位に換算した。

(3) ステップ3：バイオマスエネルギー賦存量の推計

本研究は、5項目17種のバイオマス(表-3)を推計対象とした。各バイオマス賦存量の推計式を、表-4に示す。ただし、木質系バイオマスに関しては、推計に用いるデータが得られなかったため、NEDOが作成した推計式¹²⁾とバイオマス賦存量のデータ^{13),14)}を引用した。バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第3版)¹⁵⁾を参考に、バイオマス種と適したバイオマスエネルギー変換技術の対応を表-3に示す。本研究では、導入事例が多く、今後のニーズも高いと考えられるバイオマスエネルギー変換技術として、直接燃焼、混焼、エステル化、メタン発酵、エタノール発酵を用いた。バイオマスエネルギー変換技術により代替可能なエネルギー源を直接燃焼、混焼、エステル化、メタン発酵、エタノール発酵に対してそれぞれ電力、石炭、軽油、メタガス、ガソリンとし、バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第3版)¹⁵⁾を参考に、バイオマスエネルギー賦存量を熱量単位で推計した。

表-1 対象離島の基礎データ

島名	人口[人]	面積[km ²]	耕地面積[km ²]	森林面積[km ²]
石垣島	47,973	223	83	85
宮古島	47,631	159	78	26
久米島	8,756	59	17	24
伊良部島	6,003	29	18	6
伊江島	4,935	23	11	2
西表島	2,203	289	9	269
伊是名島	1,685	14	7	4
与那国島	1,567	29	7	13
多良間島	1,335	20	10	5
南大東島	1,269	31	18	8
伊平屋島	1,253	21	3	13
合計	124,610	896	260	454

表-2 対象離島の産業別純生産

島名	非製造業	製造業	第三次産業
石垣島	14,217	3,612	80,718
宮古島	13,273	5,164	74,190
久米島	3,823	1,808	12,825
伊良部島	3,277	531	6,818
伊江島	3,202	130	5,038
西表島	1,181	366	5,496
伊是名島	1,126	0	2,143
与那国島	995	292	3,101
多良間島	931	452	1,373
南大東島	1,624	442	1,901
伊平屋島	633	85	1,361
合計	44,282	12,882	194,963

[単位：百万円/yr]

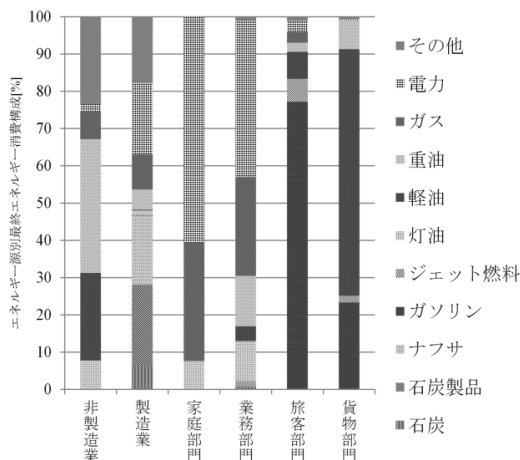


図-1 各部門のエネルギー源別最終エネルギー消費構成

(4) ステップ4：輸送による経済・環境負荷の推計

本研究では、対象離島へのエネルギー源の輸送は全て沖縄本島からの海上輸送と仮定した。この理由は、沖縄県のエネルギー自給率は99.8%と非常に低く、対象離島はエネルギー源のほとんどを県外もしくは国外からの輸送により賄っていると考えられるが、エネルギー源の輸送ルートとその物量の特定は困難なためである。また沖縄本島から対象離島への航路が特定できないため、沖縄本島から対象離島への輸送距離は直線距離に等しいと仮定して、輸送によるコスト・CO₂排出量を推計した。またエネルギー源を輸送する際の船種は、石炭と石炭製品はバルク船、ナフサとガソリンとジェット燃料と灯油と軽油と重油はタンカー、ガスはLNG船と仮定して輸送によるコスト・CO₂排出量を推計した¹⁰⁾。電力は送電ケーブルにより対象離島へ送電されており、海上輸送が行われていないため輸送によるCO₂排出量の推計対象には含めなかった。

ステップ2で推計した対象離島ごとのエネルギー源別最終エネルギー消費を充足するために必要なエ

表-3 バイオマスエネルギー変換技術の対応

項目	種別	変換技術				
		直接燃焼	混焼	エステル化	メタン発酵	エタノール発酵
木質系	林地残材	○	○			
	製材所廃材	○	○			
	建築廃材	○	○			
畜産系	肉用牛汚泥				○	
	乳用牛汚泥				○	
	養豚汚泥				○	
	排卵鶏汚泥	○				
	ブロイラー汚泥	○				
食品系	生活厨芥類				○	
	事業系厨芥類				○	
	廃食用油			○		
	動植物性残渣				○	
農業系	稲わら	○				○
	もみ殻	○				○
	バガス	○				
	糖蜜					○
汚泥系	下水汚泥				○	

ネルギー源を輸送する際に発生するコストを、式(1)で推計した。

$$C_i = \sum FEC_{i,j} \times U_{cost,j} \quad (1)$$

C_i は沖縄本島から対象離島*i*へエネルギー源を輸送する際に発生するコスト(円/yr)、 $FEC_{i,j}$ は対象離島*i*でのエネルギー源*j*の最終エネルギー消費を重量・容量・電力量単位に換算したもの(t/yr・kL/yr・MWh/yr)、 $U_{cost,j}$ はエネルギー源*j*の単位量あたりの輸送コスト(円/kg)を表す。

同様に、ステップ2で推計した対象離島ごとのエネルギー源別最終エネルギー消費を充足するために必要なエネルギー源を輸送する際に発生するCO₂排出量を、式(2)で推計した。

$$E_i = \sum FEC_{i,j} \times U_{cost,j} \times D_i \quad (2)$$

E_i は沖縄本島から対象離島*i*へエネルギー源を輸送する際に発生するCO₂排出量(tCO₂/yr)、 $FEC_{i,j}$ は対象離島*i*でのエネルギー源*j*の最終エネルギー消費(TJ/yr)、 $U_{cost,j}$ はエネルギー源*j*の輸送トンキロあたりのCO₂排出量(gCO₂/t/km)、 D_i は沖縄本島

表-4 推計対象のバイオマス種とバイオマス賦存量の推計式一覧

項目	種別	バイオマス賦存量の推計式
木質系	林地残材	素材生産量[m ³ /yr]×残材率[%]×製材比重[t/m ³]
	製材所廃材	素材消費量[m ³ /yr]×樹種別樹皮発生比率[%]×樹種別容積密度[t/m ³]
	建築廃材	建築物量[m ³ /yr]×木くず発生原単位[t/m ³]
畜産系	肉用牛汚泥	肉用牛頭数[頭]×肉用牛汚泥発生原単位[t/頭/yr]
	乳用牛汚泥	乳用牛頭数[頭]×乳用牛汚泥発生原単位[t/頭/yr]
	養豚汚泥	養豚頭数[頭]×養豚汚泥発生原単位[t/頭/yr]
	排卵鶏汚泥	排卵鶏羽数[羽]×排卵鶏汚泥発生原単位[t/羽/yr]
	ブロイラー汚泥	ブロイラー羽数[羽]×ブロイラー汚泥発生原単位[t/羽/yr]
食品系	生活厨芥類	生活系ごみ収集量[t/yr]×生ごみの排出率[%]
	事業系厨芥類	食品廃棄物発生量[t/yr]×(離島の事業所数/全国の事業所数)
	廃食用油	人口[人]×一人あたりの廃食用油排出量[t/人/yr]
	動植物性残渣	動植物性残渣発生量[t/yr]×(離島の事業所数/全国の事業所数)
農業系	稲わら	米類収穫量[t/yr]×稲わら率[%]
	もみ殻	米類収穫量[t/yr]×もみ殻発生率[%]
	バガス	さとうきび収穫量[t/yr]×バガス発生率[%]
	糖蜜	さとうきび収穫量[t/yr]×糖蜜発生率[%]
汚泥系	下水汚泥	人口[人]×濃縮汚泥発生原単位[t/人/yr]

から対象離島 i への輸送距離 (km) を表す。

3. 結果と考察

(1) 最終エネルギー消費の推計値

最終エネルギー消費は対象離島全体で 11,375TJ/yr という結果が得られた。これは、沖縄県全体の最終エネルギー消費の 13%にあたる。部門別では、旅客部門の最終エネルギー消費が 4,014TJ/yr と大きな割合を占めた。対象離島での旅客部門の最終エネルギー消費が大きくなる原因としては、石垣島や宮古島や西表島といった入域観光客数が多い離島が、沖縄本島から遠隔地に存在することが考えられる。対象離島全体では、旅客部門の最終エネルギー消費が大きいのに伴い、乗用車や貨物自動車の燃料であるガソリンと軽油が熱量単位で最終エネルギー消費の 37%を占めた。また、第三次産業が主要な産業となっている石垣島や与那国島では電力の消費が大きくなった(図-2)。

(2) バイオマスエネルギー賦存量の推計値

対象離島全体でのバイオマスエネルギー賦存量は 3,058TJ/yr となり、これは対象離島全体の最終エネルギー消費の 27%に相当した。また項目別の構成は対象離島全体で農業系 66%, 畜産系 23%, 食品系 9%, 木質系 1%, 汚泥系 0.6%となった。(図-3) 対象離島全体での森林面積が 454km² と小さく、森林から供給される木質系バイオマスは乏しい結果となった。対象離島では、肉用牛の飼育頭数が多く、肉用牛汚泥の賦存量が大きい。また農業系バイオマスは、サトウキビから発生するバガス、糖蜜の賦存量が大きくなっていることが特徴として挙げられる。

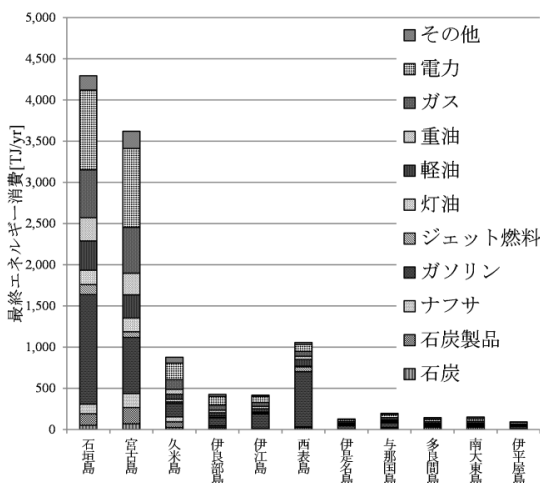


図-2 エネルギー源別最終エネルギー消費の推計値

(3) 輸送による経済・環境負荷の推計値

エネルギー源を輸送する際に発生するコストは、対象離島全体で 210,538 万円/yr という結果が得られた。エネルギー源別では、電力が輸送コストの 33%と最も大きな割合を占めた。エネルギー源別最終エネルギー消費では、ガソリンが電力を上回っていたが、輸送コストでは電力が大きくなったのは、熱量ベースでの輸送コストでは電力が最も高いことが考えられる。エネルギー源を輸送する際に発生する CO₂ 排出量は対象離島全体で 933tCO₂/yr という結果が得られた。エネルギー源別の CO₂ 排出量の構成は、輸送する船種の CO₂ 排出係数間に大差がないため、エネルギー源別最終エネルギー消費の構成に似た形となった。

(4) バイオマスエネルギー利用による負荷削減ポテンシャル

バイオマスエネルギー利用による輸送コスト削減ポテンシャルは、対象離島全体で 65,770 万円/yr という結果が得られた。これは 3. (3) で推計した輸送コストの 31%にあたる。また直接燃焼による電気への代替が、最も輸送コスト削減ポテンシャルに寄与している。バイオマスエネルギー利用による輸送による CO₂ 排出量削減ポテンシャルは、対象離島全体で 114tCO₂/yr という結果が得られた。これは 3. (2) に示した CO₂ 排出量の約 12%にあたる。またメタン発酵によるガスへの代替が、最も輸送による CO₂ 排出量削減ポテンシャルに寄与している。離島ごとでは、バイオマスエネルギー利用のみによるエネルギー自給率(熱量ベース)は南大東島 202%, 多良間島 90%, 伊是名島 80%の順で推計値を得た。

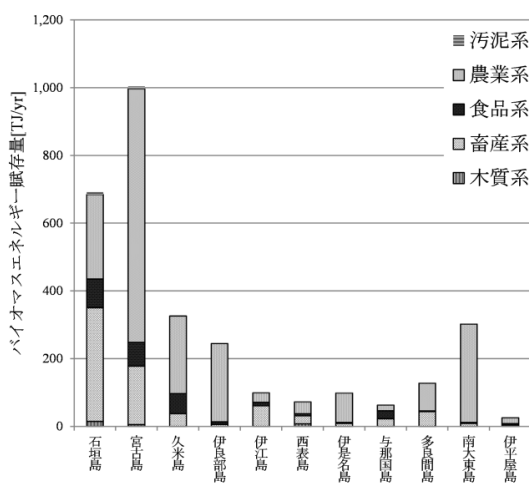


図-3 項目別バイオマスエネルギー賦存量の推計値

4. まとめと課題

(1) まとめ

本研究では、各離島に応じたエネルギー施策を考察することを目的として、離島での部門別最終エネルギー消費とエネルギー源別最終エネルギー消費とバイオマスエネルギー賦存量を推計し、輸送による経済・環境負荷に対してバイオマスエネルギー利用による負荷削減ポテンシャルを推計した。分析対象の離島全体で輸送コスト、輸送によるCO₂排出量負荷削減ポテンシャルは、現状に対してそれぞれ31%、12%という結果が得られた。

(2) 今後の課題と提案

バイオマスエネルギー利用による経済・環境への影響について考察するとき、本研究はバイオマスエネルギーを利用することで、輸送による経済・環境負荷に対しての削減ポテンシャルについて分析を行った。今後は、バイオマスの生産・収集・輸送・エネルギー変換・廃棄に伴う、全体を通じてのコスト・CO₂排出量の分析を行う必要がある。仮にバイオマスをエネルギーに変換する際の投入資源やエネルギーの相当量が、原油や石炭などの化石燃料に由来する場合、バイオマスエネルギー自体はカーボンニュートラルであっても、生産から廃棄までのすべての過程を通じてみれば、追加的なCO₂が放出されている可能性は否定できないからである。したがって、バイオマスエネルギーの変換技術ごとにライフサイクルCO₂によってCO₂排出量変化を評価する必要がある。

また本研究では各離島で生じた余剰バイオマスエネルギーは利用しないことを仮定した分析結果となっているが、実際にはそれらの余剰分は廃棄されるわけではなく、バイオマスエネルギーが島内の需要を十分に満たせていない近隣の離島が存在すれば、それらに島に分配する、あるいは二酸化炭素収支が許せば沖縄本島への輸送などが考えられるため、今後の連携施策の検討が必要である。

参考文献

- 三菱総合研究所：平成22年度石油産業体制等調査研究，2011，2012.8.31 参照。
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/11609b01_00j.pdf>
- 農林水産省：「バイオマス・ニッポン総合戦略」，2005
- 倉阪秀史：永続地帯2010年版報告書，2012.8.31 参照。 <<http://sustainable-zone.org>>
- 沖縄県観光商工部産業政策課：沖縄県エネルギービジョン，2010。
- 資源エネルギー庁：市町村別エネルギー消費統計作成のためのガイドライン，2006，2012.8.31 参照。
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_editon/ref3.pdf>
- 日本離島センター：離島統計年報，CD-ROM 版
- 沖縄県企画部統計課管理資料班：第52回沖縄県統計年鑑，2009，2012.8.31 参照。
<<http://www.pref.okinawa.jp/toukeika/yearbook/yearbook52>>
- 沖縄県企画部地域・離島課：離島関係資料，2012，2012.8.31 参照。
<<http://www3.pref.okinawa.jp/site/view/contview.jsp?catid=39&id=14408&page=1>>
- 沖縄県企画部統計課：平成17年度県民経済計算，2012，2012.8.31 参照。
<http://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/kenmin/files/contents/pdf/gaiyou1_1.pdf>
- 資源エネルギー庁：2007年度総合エネルギー統計エネルギーバランス表
- NEDO：エネルギー源別標準発熱量，2008，2012.8.31 参照。
<http://www.nedo.go.jp/informations/koubo/181220_1/shiryoku1.pdf>
- NEDO：バイオマス賦存量・利用可能量の推計，2012.8.31 参照。
<<http://app1.infoc.nedo.go.jp/biomass>>
- 環境省：平成20年一般廃棄物処理実態調査
- 統計局：2005年度事業所・企業統計調査
- NEDO：バイオマスエネルギー導入ガイドブック(第3版)，2010
- 松倉洋史，勝原光治郎：カーフェリーによる離島への危険物輸送の規制緩和の経済的評価，海上技術安全研究所報告，4巻，pp.833-905，2004
(2012.7.18 受付)

ANALYZING ADDITIONAL ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL LOAD IN REMOTE ISLAND CAUSED BY TRANSPORTATION AND POTENTIAL OF BIOMASS ENERGY TO MITIGATE THEM

Yuki MORI, Takashi MACHIMURA and Takanori MATSUI

Japan is island country. Due to the remoteness of these islands, fuel costs and CO₂ emissions related to transportation are high. Since the enactment of the Kyoto Protocol, biomass energy, namely storable renewable energy, has been an attractive subject in Japan. This research analyzed final energy consumption and quantity of biomass energy in remote islands in Okinawa. Substituting current energy sources with biomass energy in transportation to remote islands, we can expect reduction of economic and environmental load caused by transportation. Analysis showed that transportation costs can be cut down by 31% and CO₂ emissions by 12% through utilizing biomass energy in transportation to the islands as well as in use on the islands.