地域資源・経済循環を考慮する 持続可能エネルギーシステムの設計

菊池 美南¹・古林 敬顕²・中田 俊彦³

¹サステナジー株式会社 (〒108-0074 東京都港区高輪1-25-2)
E-mail: minami.kikuchi@sustainergy.co.jp

²東北大学助教 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉6-6-11-815)
E-mail: furubayashi@m.tohoku.ac.jp
³東北大学教授 工学研究科 (同上)
E-mail: nakata@m.tohoku.ac.jp

わが国では、一次エネルギーの94パーセントを輸入化石燃料に依存して、大量のCO₂排出に加えて国内資本が海外へ流出している。本研究では、福島県を対象として地域資源を有効利用する低炭素でかつ地域経済活性化に資する持続可能なエネルギーシステムを設計することを目的とする。地域に賦存する再生可能エネルギー資源量を推計し、県内の電力・熱需要を満たすエネルギーシステム構成を線形計画問題を解いて決定する。さらに、設計したシステム性能を経済波及効果など多様な観点から評価し、持続可能なエネルギーシステムの価値について考察する。設計の結果、風力発電導入量の増加と木質バイオマス資源を燃料とする地域熱供給システムの実現を通じて、地域資源を有効利用してかつ海外流出するキャッシュが大幅に減少可能なエネルギーシステムを構築できることが明らかとなった。

Key Words : energy system, renewable energy, sustainability, local area, economic ripple effect

1. 序論

2015年に採択されたパリ協定にて、日本は2030年までに温室効果ガスを約26%削減する約束草案を提出した。それ以降の大幅削減に向けて、わが国は化石燃料に依存したエネルギーシステムから脱却する必要がある。

Partha et al.¹⁾, Castellanos et al.²⁾, Omu et al.³⁾らは、太陽光等の再生可能エネルギーを取り入れたエネルギーシステムを設計しているものの、電力供給に限定し熱需要は考慮していない。また、これらの研究は設計手法に重きをおいたものが多く、システムに対する評価項目は少なく、十分な検討がされていない。たとえば、コストによって経済性を評価することが多いが、新規設備の導入に伴う経済効果を考慮している研究は少ない。伊藤ら⁴⁾、鈴木ら⁵⁾は再生可能エネルギー導入に伴う経済波及効果を試算しているが、エネルギーシステムの設計には至っていない。稗貫⁶⁾は、産業連関表を用いて再生可能エネルギーの導入に伴う経済分析を行っているが、電源構成の異なるシナリオに対する評価であり、実際に導入するエネルギーシステムを詳細に設計していない。

楊ら⁷⁾は、北九州学研都市を対象として分散型エネ

ギーシステムの構築に関するケーススタディを行った。施ら⁸⁾は、多目的解析を用いて分散型エネルギーシステムの最適化に関する研究を行った。この2つの事例は電力需要と熱需要を対象に最適化を行っているが、ガスエンジン等の化石燃料を用いており、複数種の再生可能エネルギーは考慮されていない。また、分散型エネルギーシステムが導入された後の地域への経済波及効果の評価には至っていない。

そこで、本研究では電力と熱を対象としてエネルギーシステムを設計し、経済波及効果など複数の評価指標を用いて、システムを多様な観点から評価する。また、持続可能な地域社会の実現に向けて、低炭素かつ地域経済を活性化させるエネルギーシステムの設計を目的とする。

本研究では、東日本大震災以降、再生可能エネルギーを利用した新たな社会づくりを推進する機運が高まっている福島県を対象とする。再生可能エネルギーを利用することによって、安全かつ低炭素なエネルギーシステムを構築する。また、県内に新たな産業を創成することで雇用を創出し、復興の一助となるようなエネルギーシステムの設計をめざす。

はじめに、GISを用いて福島県内のエネルギー需要量

図-1 エネルギーシステムの構成

と資源賦存量を推計する。対象とする需要は、家庭・業務部門の電力および熱である。地域に賦存する資源として陸上風力、洋上風力、太陽エネルギー、木質バイオマスを対象とする。太陽エネルギーについては住宅の屋根に設置する住宅用と、地面に大規模に設置する産業用に分ける。また、既存技術としてLPG、都市ガス、灯油、系統電力も考慮する。木質チップを燃料とするCHPは電力と熱を供給する。本研究で対象とするエネルギーシステムの構成を図-1に示す。

つぎに、推計した需要を満たすエネルギー供給構成を線形計画問題を解いて決定する。ここで定めたエネルギーシステムの仕様を多様な観点から考察し、持続可能社会の実現について検討する。特に、地域経済の循環を評価するために産業連関表を用いて経済波及効果を算出して、地域経済の特徴を考察する。

2. 福島県内のエネルギー需要量と資源賦存量

地域需要を可能な限り地域に賦存する資源で賄うシス

テムを設計するため、福島県内のエネルギー需要量と、エネルギー資源の賦存量を推計する。なお、推計にあたって震災前のデータを用いているが、これは将来地域社会が復旧した状態を想定してエネルギーシステムを設計しているため、結果の有用性には影響を与えない。

(1) 需要量の推計

家庭部門は世帯あたり原単位⁹⁾、業務部門は床面積あたり原単位¹⁰⁾を用いて年間の電力および熱需要を推計する。さらに、月別・時刻別の比率¹¹⁾を用いて時間別需要を推計する。年間需要量の推計結果を表-1に示す。

(2) 資源量の推計

地域資源の年間賦存量を推計する。再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書¹²⁾を参考にして、表-2に示す土地区分を推計の対象から除外する。資源の賦存量から二次エネルギーの供給可能量を求める。

都市ガスの原料であるLNGは地域資源ではないが、既設のガス管を通じて供給されるため、供給量には限界がある。よって、年間供給可能量を過去の実績から求める。また、住宅用太陽光パネルの設置可能屋根面積は、建蔽率を60%とし、屋根の半分について設置するため、建物用地の30%として推計する。木質バイオマスの賦存量については、本研究では木質バイオマスの活用と林道整備が進み、県内の森林成長分をすべて使えると想定した。

表-1 福島県におけるエネルギー需要量の推計結果

	電力	熱	
		計 (暖房) (給湯)	
家庭部門 [PJ/年]	14.5	26.1	(14.9) (11.2)
業務部門 [PJ/年]	18.8	12.4	(7.6) (4.8)
合計 [PJ/年]	33.3	38.5	22.5 16.0

表-2 賦存量の推計から除外する土地区分

	陸上風力	洋上風力	太陽エネルギー	木質バイオマス
社会条件	自然公園地域 自然保全地域 鳥獣保護区 保安林 都市地域	自然公園地域 漁業権設定区域	自然公園地域 自然保全地域 鳥獣保護区 保安林	自然公園地域 自然保全地域 鳥獣保護区 保安林
自然条件	標高 1,000m 以上 傾斜 20°以上 風速 5.5m/s 以下	離岸距離 30km 以上 水深 200m 以深	標高 1,000m 以上 北・東・西・北東・北西向かつ傾斜 10°以上、および南・南東・南西向かつ傾斜 30°以上	
土地区分	田、建物用地、 道路、鉄道、 その他の用地、 河川及び湖沼、 海水域、ゴルフ場		田、森林、道路、鉄道、 海水域、ゴルフ場、 建物用地(産業用の場合)	

表-3 福島県における資源賦存量の推計結果

資源	変換機器	賦存量 [PJ/年]	最大電力 供給量 [PJ/年]	最大熱 供給量 [PJ/年]
陸上風力	風車	55.9	19.6	-
洋上風力	風車	153.5	53.7	-
太陽エネルギー (住宅用)	太陽光パネル 太陽熱集熱器	832.8	124.9	- 499.7
太陽エネルギー (産業用)	太陽光パネル 太陽熱集熱器	662.9	99.4	- 397.7
木質バイオマス	CHP チップボイラ	55.7	11.1	16.7 44.6
都市ガス	ガスボイラ	-	-	10.8

資源賦存量の推計結果を表-3に示す。さらに風力、太陽エネルギーは天候や時間帯による時間変動があるため、時間ごとの風速および日射量データを用いて時間別供給可能量を推計する。ここで、最大電力量及び最大熱量は、一次エネルギー量をすべて電力または熱に変換した値を示す。

3. エネルギーシステムの最適化および評価方法

持続可能なエネルギーシステムを明らかにするため、複数の条件下で線形計画問題を解くことによって、福島県における最適なエネルギーシステム構成を求める。また、考察を深めるための設計したシステムの評価方法を述べる。

(1) CO₂排出量および総コスト最小化問題の定式化

低炭素社会を構築するためにはCO₂排出量を抑制しなければならない。しかしCO₂排出の少ない再生可能エネルギーは現在化石燃料に比べてコストが高く、これらはトレードオフの関係にあると考えられる。そこで、CO₂とコストの関係を明らかにするために、CO₂排出量最小化を目的関数とする場合と総コスト最小化を目的関数とする2つのケースについて線形計画問題を解く。

CO₂最小化の場合の目的関数を式(1)に示す。

$$\min. CO_2 \text{ emission} = \sum_i \sum_h Input_{h,i} \cdot ef_i \quad (1)$$

$$Input_{h,i} = \frac{G_{h,t}}{\eta_i} \quad (2)$$

ここで、 i : 資源、 t : 変換機器、 h : 時間、 $Input$: エネルギー投入量[GJ]、 ef : CO₂排出係数[t-CO₂/GJ]、 G : エネルギー供給量[GJ]、 η : 変換効率[-]である。CO₂排出係数を表-4に示す。

総コスト最小化の場合の目的関数を式(3)に示す。

$$\min. C_{total} = C_{capital} + C_{O\&M} + C_{fuel} \quad (3)$$

$$C_{capital} = \sum_t cpc_t \cdot Cap_t \cdot CRF \quad (4)$$

$$C_{O\&M} = \sum_t omc_t \cdot Cap_t \quad (5)$$

$$C_{fuel} = \sum_i flc_i \cdot \sum_h Input_{h,i} \quad (6)$$

$$G_{h,t} \leq Cap_t \cdot 3600 \quad (7)$$

ここで、 $C_{capital}$: 初期設置費[JPY]、 $C_{O\&M}$: 運転維持費[JPY]、 C_{fuel} : 燃料費[JPY]、 cpc : 初期設置費単価[JPY/GW]、 omc : 運転維持費単価[JPY/GW/year]、 flc : 燃料費単価[JPY/GJ/year]、 Cap : 機器容量[GW]、 CRF : 資本回収係数[-]である。設置費の単価を表-5に、燃料費単価を表-6に示す。

表-4 CO₂排出係数

CO ₂ 排出係数	
	[t-CO ₂ /GJ]
風力	0
太陽エネルギー	0
木質バイオマス	0
LPG ¹³⁾	0.059
灯油 ¹³⁾	0.068
都市ガス ¹³⁾	0.050
系統電力 ¹⁴⁾	0.078

表-5 設置費単価

	初期費用 [万円/kW]	運転維持費 [万円/kW]
陸上風車 ¹⁵⁾	30.0	0.6
洋上風車 ¹⁶⁾	60.0	2.0
太陽光パネル(住宅用) ¹⁵⁾	36.4	0.4
太陽光パネル(産業用) ¹⁵⁾	29.0	0.6
太陽熱集熱器(住宅用) ¹⁷⁾	21.6	0.2
太陽熱集熱器(産業用) ¹⁵⁾¹⁷⁾	17.2	0.3
木質チップ CHP ¹⁸⁾	60.0	4.0
木質チップボイラ ¹⁹⁾	33.0	0.3

表-6 燃料費単価

燃料費	
	[円/GJ]
陸上風力	0
洋上風力	0
太陽エネルギー	0
木質バイオマス ¹⁹⁾	1,083
LPG ²⁰⁾	6,170
灯油 ²¹⁾	2,652
都市ガス ²²⁾	4,542
系統電力 ²³⁾	5,070

(2) CO₂削減率に対する感度解析の方法

環境性、経済性を両立するエネルギーシステムを明らかにするために、CO₂削減率を変化させ、システムに与える影響を解析する。CO₂削減率は2012年度のCO₂排出量と比較したときの数値とする。3.(1)においてCO₂最小化とした場合のCO₂削減率をCO₂min、総コスト最小化とした場合のCO₂削減率をCO₂maxとして、この間を5%刻みで変化させる。目的関数は総コスト最小化として、式(3)を用いる。

(3) 制約条件

エネルギーの需給バランスと資源賦存量についての制約条件を式(8)、式(9)および式(10)のとおり設定する。資源賦存量については、資源が陸上風力、洋上風力、太陽エネルギーの場合は、時刻 h ごと、資源が木質バイオマス、都市ガスの場合は、年間合計での制約とする。

$$\sum_t G_{h,t} = D_h \quad (8)$$

$$P_{h,i} \geq Input_{h,i} \quad (9)$$

$$P_i \geq \sum_h Input_{h,i} \quad (10)$$

ここで、 D ：需要量[GJ]、 P ：資源量[GJ]である。

(4) 評価指標の定義

システムを多様な観点から考察するため、新たに3つの評価指標を定義する。

a) TPES

エネルギー効率を測る指標として、TPES(Total Primary Energy Supply)を式(11)に定義する。制約条件においてエネルギー供給量と需要量は一致しているため、TPESが小さいほどエネルギー効率が高いことを表す。

$$TPES = \sum_i \sum_h Input_{h,i} \quad (11)$$

b) HHI

エネルギー資源の多様性を測る指標として、HHI(Herfindahl-Hirschman Index)を式(12)に定義する。HHIは、相対的に値が大きいと資源が集中しており、値が小さいと資源が分散していることを表す。

$$HHI = \sum_i p_i^2 \quad (12)$$

$$p_i = \frac{G_i}{\sum_i G_i} \quad (13)$$

ここで、 p_i ：資源 i による供給量が全体に占める割合、 G_i ：資源 i による供給量[GJ]である。

c) 経済波及効果

地域内の経済循環を評価するため、新規需要の発生に

よる生産誘発額を経済波及効果として式(13)のとおり定義する。 X_{ind} は、福島県内における各産業の経済波及効果の合計である。産業部門 k の経済波及効果額を要素とする列ベクトル X は、行列式(14)によって算出される。

$$X_{total} = \sum_k X_k \quad (14)$$

$$X = [I - (I - \hat{M})A]^{-1}(I - \hat{M})FD \quad (15)$$

$$FD_n = \sum_t \alpha_{capital,t} \cdot C_{capital,t} + \sum_t \alpha_{O\&M,t} \cdot C_{O\&M,t} + \sum_i \alpha_{fuel,i} \cdot C_{fuel,i} \quad (16)$$

ここで、 X_k ：産業部門 k の県内生産額 [JPY]、 I ：単位行列、 $\hat{M}$ ：移輸入係数を主対角要素にとった対角行列、 A ：投入係数行列、 FD ： FD_n を要素とする列ベクトル、 FD_n ：産業部門 n の最終需要[JPY]、 α ：新規需要計上率である。新規需要計上率とは、各コストがそれぞれの産業部門の新規需要額として計上される割合を表しており、参考文献²⁹等を利用して計上している。新規需要計上率を表-7に示す。

なお、経済波及効果の算出に用いる産業連関表は、最新版である平成17年福島県107部門表を統合・分割したものを使用し、輸入率および県外からの移入率はこの表中の値に準ずるものとする。平成23年の震災によって産業構造が変化しているが、本研究では地域社会が復旧した場合を想定して考察を行っているため、震災前の産業構造を反映した経済波及効果を用いて評価することは適切である。

4. 解析結果および考察

(1) CO₂排出量または総コストが最小となるエネルギーシステム

a) エネルギー供給構成の比較

それぞれのケースのエネルギー供給構成を図-2に示す。CO₂最小化の場合、風力発電や木質バイオマスを中心に需要のほとんどが再生可能エネルギーによって賄われており、CO₂削減率は97.7%となった。一方、総コスト最小化の場合、系統電力によって20%程度の電力需要が賄われているが、それ以外はほとんど風力発電によって賄われている。熱需要はコストが安価な灯油によって60%程度が賄われている。このときのCO₂削減率は63.7%となった。

このとき、HHIはCO₂最小化の場合が0.31、総コスト最小化の場合が0.20であり、経済シナリオのほうが多様な資源を利用していることがわかる。また、TPESはCO₂最小化の場合が92.1PJ、総コスト最小化の場合が

表-7 新規需要計上率

	種別	要素	割合	産業部門
初期費用	陸上風車	タワー ナセル ブレード 設置	0.18	鋼管
			0.24	回転電気機械
			0.18	プラスチック製品
			0.4	その他の土木建設
	洋上風車	タワー ナセル ブレード 設置	0.18	鋼管
			0.24	回転電気機械
			0.18	プラスチック製品
			0.4	その他の土木建設
		船舶輸送	0.05	水運
	太陽光パネル(住宅用)	太陽電池 設置	0.7	太陽電池
			0.3	住宅建築(非木造)
	太陽光パネル(産業用)	太陽電池 設置	0.5	太陽電池
			0.5	その他の土木建設
運転維持費	太陽熱集熱器(住宅用)	集熱器 設置	0.7	ガス・石油機器及び暖房機器
			0.3	住宅建築(非木造)
	太陽熱集熱器(産業用)	集熱器 設置	0.5	ガス・石油機器及び暖房機器
			0.5	その他の土木建設
	木質チップCHP	ボイラ タービン 設置	0.2	ボイラ・タービン
			0.6	ボイラ・タービン
			0.2	その他の土木建設
	木質チップボイラ	ボイラ 設置	0.5	ボイラ・タービン
			0.5	その他の土木建設
	洋上風車	部品修理 建屋等修理	0.48	機械修理
			0.48	建設補修
			0.05	水運
	洋上風車以外の機器	部品修理 建屋等修理	0.5	機械修理
			0.5	建設補修
燃料費	木質バイオマス	木質チップ	1	木材チップ
	LPG	原油コスト 小売マージン	0.5	石油製品
			0.1	小売
	灯油	原油コスト 小売マージン	0.5	石油製品
			0.1	小売
	都市ガス 系統電力	都市ガス 電気代	1 1	都市ガス 電力

84.8PJであり、総コスト最小化のシステムのほうがエネ

ルギー効率が低い。これは、灯油ボイラの変換効率が低いと考えられる。

b) 経済性

年間あたりの総コストはCO₂最小化の場合が7,279億円、総コスト最小化の場合が1,977億円となった。CO₂最小化の場合、再生可能エネルギーを最大限利用するために多くの設備が導入され、初期設置費が非常に大きくなった。総コスト最小化の場合、少ない設備容量で高い利用率を維持し運転することでコストが抑えられる。

年間の経済波及効果は、CO₂最小化の場合が6,531億円、総コスト最小化の場合が1,438億円であった。おもな産業への経済波及効果を図-3に示す。CO₂最小化の場合は設備導入量が大きいため、建設関連産業への経済効果が大きい。総コスト最小化の場合、化石燃料の使用量が多く、設備導入量が小さいため地域への経済波及効果は小さい。

(2) CO₂削減率の変化に伴うエネルギーシステムへの影響

a) エネルギー供給構成の変化

CO₂削減率の変化に伴うエネルギー供給構成の変化を図-4および図-5に示す。CO₂排出量を削減するほど、電力供給においては洋上風力や木質CHPの割合が大きくなる。熱供給では、灯油に代替して木質バイオマスボイラや木質CHPの割合が大きくなる。

また、各評価指標の変化を図-6に示す。TPESは、削減率が75%程度のときに最小となり、このときエネルギーを効率よく利用していることがわかる。また、HHIは削減率が約70%のときに最小となり、このときにもっとも多種の地域資源を利用しているといえる。

b) 経済性

図-6をみると、CO₂排出量を削減するほど総コストが増大し、それに伴い新規需要が大きくなるため、経済波及効果はCO₂削減率が高いほど大きい。総額だけでは新規需要の変化が地域経済へ与える影響の違いを評価することが難しい。よって、総コストに対する経済波及効果の割合を経済波及率と定義してその推移を示す。このグラフより、削減率が75%程度のときに現状と同程度の水準となり、削減率が95%を超えると新規需要のうち約9割が地域経済に波及することがわかる。

(3) 持続可能なエネルギーシステムについての考察

以上の結果から、CO₂削減率が75%程度のときに地域への経済循環、エネルギー効率、資源の多様性の評価が高いといえる。このときの負荷曲線を図-7および図-8に示す。電力供給は、洋上風力がベース電源、陸上風力がミドル電源、太陽光がピーク電源として稼働しており、それ以外の部分を系統電力で賄っていることがわかる。

風力発電は洋上も含めると資源賦存量は豊富であり、設備利用率は太陽光発電よりも高いため、設備容量を増やしていけば持続可能なエネルギーシステムにおける主要電源になり得る。

一方、熱供給は木質バイオマスボイラがベース熱源、太陽熱がピーク熱源として稼働しており、それ以外の部分を灯油で賄っている。CO₂削減率が98%のときにHHIが最大となり、資源が集中していることを表しているが、これは熱供給において木質資源の依存度が高いためだと

図2 福島県における電力および熱供給構成の比較(3-6)

図3 福島県の各産業への経済波及効果

図4 電力供給構成の変化

図5 熱供給構成の変化

図6 CO₂削減率の変化に伴う
エネルギーシステムへの影響

図7 CO₂削減率75%のときの電力負荷曲線

図8 CO₂削減率75%のときの熱負荷曲線

図9 CO₂削減率75%のときのキャッシュフロー(単位：億円/年)

考えられる。木質資源は地域に分散して賦存していて、計画的に伐採すれば枯渇することもない持続可能な資源であるといえる。また、災害などで道路が寸断された場合でも一定期間資源を供給できるように貯蔵すれば、エネルギー供給途絶のリスクを抑えることができる。よって、木材資源の供給システムを確立すれば、大部分の熱源を木質資源に代替可能であり、CO₂をさらに削減することができる。

また、このときのキャッシュフローを図-9に示す。現在は化石燃料を大量に輸入しており、福島県では年間のエネルギー支出3,106億円に対して1,424億円のキャッシュが海外へ流出している。しかし地域内の資源を利用しエネルギー設備を地域内で生産すると、海外へ流出するキャッシュは約3分の1になり、全体の約半分のキャッシュが地域内で循環することがわかる。

よって、風力発電の導入を推進し、木質資源による供給システムを確立し供給量を増加させることで、低炭素かつ地域経済の循環が活性化する持続可能なエネルギーシステムの構築が可能だといえる。

5. 結論

本研究では、福島県内のエネルギー需要量と供給可能量を明らかにし、地域内の資源を有効利用するシステムを設計した。さらに、経済性や資源の多様性などの観点からシステムを評価して、持続可能なエネルギーシステムの構成を明らかにした。

資源賦存量を推計した結果、福島県内には需要を十分に満たす再生可能エネルギーが賦存していることがわかった。

CO₂削減率に対する感度解析の結果、2012年度比のCO₂削減率が75%程度のときに経済循環、エネルギー効率、資源の多様性についての評価に優れ、持続可能なシステムだといえる。このとき電力は、洋上風力がベース電源、陸上風力がミドル電源、太陽光がピーク電源として稼働していて、残りの一部を系統電力によって賄って

いる。熱は、木質バイオマスボイラがベース熱源、太陽熱がピーク熱源として稼働しており、それ以外を灯油によって賄っている。このとき、地域内資源を有効に利用しており、エネルギー設備を可能な限り地域内で生産すると海外へ流出するキャッシュは現状の約3分の1になり、地域内の経済循環が活性化されると考えられる。

木質資源を単一の地域資源として捉えると資源の多様性に乏しいとみなされるが、木質資源は地域に分散して分布する資源である。よって、木材の供給システムを確立することができれば、木質資源による供給量を増加させてもエネルギー供給途絶などのリスクを抑えることができ、CO₂排出量をさらに削減することができる。よって、現在よりも風力発電による供給量を増加させ、木質資源を有効利用できるシステムを形成することによって持続可能なエネルギーシステムを構築することができると考えられる。

本研究では、地域社会の復旧を想定して、エネルギー需要量等を東日本大震災以前と同じであるとしたが、東日本大震災以前まで復旧することが可能なのか、またそれまでにどれだけの期間がかかるのか等は、今後の検討課題である。

謝辞：国立環境研究所社会環境システム研究センターの皆様には有意義な助言を頂戴いたしました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Partha Kayal, C.K. Chanda : Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network, Renewable Energy, 75, 173-186, 2015.
- 2) J.G. Castellanos et al., : Modelling an off-grid integrated renewable energy system for rural electrification in India using photovoltaics and anaerobic digestion, Renewable Energy, 74, 390-398, 2015.
- 3) Akomemo Omu et al., : Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming, Energy Policy, 61, 249-266, 2013.
- 4) 伊藤吉紀, 中田俊彦 : バイオマスエネルギーの導入に伴う経済波及効果の評価, バイオマス科学会議発表論文集, 114-115, 2007.
- 5) 鈴木達也ら : 中小水力発電と再生可能エネルギー導入の地域経済波及効果, 早稲田社会科学総合研究別冊 2012 年度学生論文集.
- 6) 稗貫峻一 : 産業連関表を用いた再生可能エネルギー技術導入に伴う環境・社会経済分析, 横浜国立大学大学院博士学位論文.
- 7) 楊湧文, 高偉俊ら : 分散型エネルギーシステムの経済的な運転最適化モデルの構築と北九州学研都市におけるケーススタディ, 日本建築学会環境系論文集 第 621 号, 77-82, 2007 年 11 月.
- 8) 施行之, 高偉俊 : 分散型電源・熱源技術の計画における多目的分析及び最適化に関する研究, 日本建築

- 学会環境系論文集 第 78 巻 第 684 号, 183-191, 2013 年 2 月.
- 9) 住環境計画研究所：家庭用エネルギー統計年報, 2012.
 - 10) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編：EDMC/エネルギー・経済統計要覧, 2015.
 - 11) 都市環境エネルギー協会：地域冷暖房技術手引書改訂第 4 版, 2013.(3-1)
 - 12) 環境省：平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書, 2011.4.
 - 13) 一般社団法人日本ガス協会
 - 14) 東北電力
 - 15) 第 19 回調達価格等算定委員会資料
 - 16) 経産省, 養生風力の調達価格に係る研究会
 - 17) 自然循環式太陽温水器サナース
 - 18) 未利用木質バイオマス利用発電モデルプランと試算結果
 - 19) 木質バイオマスボイラ導入・運用にかかわる実務テキスト
 - 20) プロパンガス料金消費者協会
 - 21) 石油製品価格調査, 資源エネルギー庁
 - 22) ガス事業便覧, 福島県平均値
 - 23) 東北電力
 - 24) The Crown Estate : A Guide to an Offshore Wind Farm .

(2016. 3. 22 受付)

DESIGN OF THE SUSTAINABLE ENERGY SYSTEM IN A LOCAL AREA CONSIDERING ECONOMIC AND RESOURCE CIRCULATION

Minami KIKUCHI, Takaaki FURUBAYASHI and Toshihiko NAKATA

In Japan, fossil fuels imported supply about 90% of primary energy, which occurring large amount of CO₂ emission and outflow of domestic funds to other countries. The objective of this study is to design the local energy system using local resources which can realize low emission and economic circulation in the area. The targeted area is Fukushima prefecture. First, the amount of energy resources in local area is estimated using GIS. Second, the energy system is optimized in terms of CO₂ emission and cost, then the system is evaluated from multi points of view which are economic effect, energy efficiency and resource diversity. As a result, it is concluded that if more wind energy and wood biomass used the CO₂ emissions will be decreased to almost 0 and economic ripple effect in the local area will be increased.