

地域内の経済および資源の循環を考慮した エネルギーシステムの試設計

菊池 美南¹・古林 敬顕²・中田 俊彦³

¹東北大学 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉6-6-11-816)
E-mail: minami.k@dc.tohoku.ac.jp

²東北大学助教 工学研究科 (同上)
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

本研究では、福島県相馬地域を対象に持続可能なエネルギーシステムを試設計し、経済性や環境性を評価する。輸入燃料に依存している現在のシステムから脱却し、地域に賦存する再生可能エネルギーを有効利用し、環境性・経済性に優れた地域エネルギーシステムを設計することを目指す。GISを用いて地域内のエネルギー需要と資源賦存量を推計する。地域資源は風力、太陽エネルギー、木質バイオマスを対象とする。CO₂排出量を0とすると、コスト最小化が目的関数の場合には総コストは現在の約12倍であり、経済波及効果最大化が目的関数の場合には総コストは現在の15倍で、経済波及効果は新規需要額の約1.2倍得られる。環境性と経済性の間にはトレードオフの関係があるが、地域資源を有効利用することで環境性を保ち、地域経済を活性化することができる。

Key Words : Local energy system, Optimization, Renewable energy, Economic effect, GIS

1. 緒言

現在の日本のエネルギーシステムは、身近に存在する再生可能エネルギーが有効利用されておらず、海外から輸入される化石燃料に依存している。特に、人口が密集していない地方ではそれが顕著であり、輸入燃料をコストと手間をかけて各家庭に輸送するという現状である。東日本大震災の際には、大規模な供給基地がない地方で燃料が十分に流通せず、復旧までに多くの時間がかかるなど、現在のエネルギーシステムの脆弱性が明らかになった。日本には未利用の再生可能エネルギーが大量に賦存しているため、このエネルギーを利用した地域分散型のエネルギーシステムを導入すべきである。

本研究では、地域内の資源を利用するエネルギーシステムモデルを作成し、CO₂排出量等を制約条件として2パターンでの最適化計算を行い、経済性や環境性を評価する。なお、送電線への連係可能量を考慮しないなど、必ずしも現実に即していないモデル設計とする。また地域資源を有効利用することで、資源および経済を地域内で循環させ、災害などの外部要因に対する頑強性を持った持続可能な社会システムをデザインすることを目指す。

2. 解析手法

本研究では、はじめに地域内のエネルギー需要を推計し、需要量を把握する。次に地域内の再生可能エネルギーの賦存量を推計し、利用可能なエネルギー量を把握する。最後にこれらを入力データとする最適化モデルを設計し、解析を行う。コスト最小化を目的関数とする計算と、経済波及効果最大化を目的関数とする計算の2パターンを行い、BAUケースと比較する。

(1) 対象地域

本研究では、福島県の北東部に位置する新地町、相馬市、南相馬市、飯舘村からなる相馬地域を対象とする。この地域は津波で大きな被害を受けた地域であり、原発事故によって避難した住民も多く、震災以前の街並みを取り戻すべく復興が急がれている地域である。

(2) エネルギー需要量の推計

対象地域の家庭、業務、産業部門の電力および熱需要をGISを用いて推計する。熱需要は暖房需要と給湯需要である。推計した結果を表-1に示す。

(3) 再生可能エネルギー賦存量の推計

地域内の再生可能エネルギー賦存量を推計する。対象とするエネルギーは風力、太陽エネルギー、木質バイオマス¹⁾である。なお、太陽エネルギーについては産業用と住宅用に区別して賦存量を算出する。産業用とはメガソーラーのように大規模に設置するもので、住宅用とは住宅やビルの屋根に設置するものを想定している。GISを用いて土地の利用用途等を考慮して推計する。結果を表-2に示す。

表-1 エネルギー需要量

	電力 (GJ)	熱 (GJ)
家庭部門	567,337	1,029,951
業務部門	1,540,266	2,649,920
産業部門	1,576,137	1,051,011
計	3,683,740	3,190,616

表-2 再生可能エネルギーの賦存量

資源	賦存量(GJ)
風力	8,820,021
住宅用太陽エネルギー	57,081,243
産業用太陽エネルギー	98,604,265
木質バイオマス	792,505

表-3 資源に関するパラメータ

	燃料価格 (万円/GJ)	CO ₂ 排出係数 (t-CO ₂ /GJ)
風力	0	0
太陽エネルギー(住宅用)	0	0
太陽エネルギー(産業用)	0	0
木質バイオマス	0.108	0
LPG	0.617	0.059
灯油	0.242	0.068
都市ガス	0.352	0.059
系統電力	0.507	0.164

表-4 変換機器に関するパラメータ

	建設費 (億円/GW)	運転維持費 (億円/GW)	設備利用率		機器効率	
			電力	熱	電力	熱
風車	3,000	60	0.2	-	0.35	-
PV(住宅用)	3,640	36	0.13	-	0.15	-
PV(産業用)	2,900	60	0.13	-	0.15	-
太陽熱集熱器(住宅用)	2,163	20	-	0.13	-	0.6
太陽熱集熱器(産業用)	1,733	33	-	0.13	-	0.6
バイオマスCHP	6,000	400	0.8	0.8	0.2	0.3
バイオマスボイラ	3,300	26	-	0.8	-	0.8
化石燃料ボイラ	0	0	-	1	-	0.9
系統電力	0	0	1	-	1	-

(4) システムフローの設計

解析に用いるシステムフローを図-1に示す。既存のシステムとして、系統電力、LPG、灯油、都市ガスを含める。需要また、資源および変換機器に関するパラメータを表-3, 4に示す。

(5) BAUケースの設定

解析結果と比較するため、現状のエネルギーシステムであるBAUケースの総コストと総CO₂排出量を算出する。BAUケースを表-5の通り設定する。

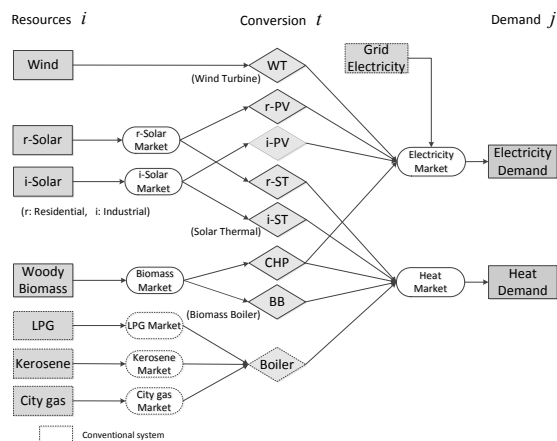


図-1 システムフロー

表-5 BAUケースの設定

資源	供給量 (GJ)	コスト (億円)	CO ₂ 排出量 (t-CO ₂)
電力 系統電力	3,683,740	186.8	604,747
熱 LPG	1,200,402	82.3	78,693
灯油	1,595,357	42.9	120,184
都市ガス	394,857	15.4	25,885
計		327.4	829,509

(6) 最適化モデル

ここでは、2パターンでの最適化モデルの目的関数と制約条件を記述する。それぞれ感度分析を行い、BAUケースと比較する。

a) コスト最小化

まず、総コスト最小化を目的関数として最適化計算を行う。目的関数は(1)式で表され、建設費(2)、運転維持費(3)、燃料費(4)の和で表す。

$$\min \quad C_{total} = C_{SCC} + C_{OMC} + C_{FLC} \quad (1)$$

$$C_{SCC} = \sum_t \left(SCC(t) \cdot \sum_i Cap(i, t) \right) \quad (2)$$

$$C_{OMC} = \sum_t \left(OMC(t) \cdot \sum_i Cap(i, t) \right) \quad (3)$$

$$C_{FLC} = \sum_i \left(FLC(i) \cdot \sum_t E(i, t) \right) \quad (4)$$

ここで、 $SCC(t)$ は変換機器 t の初期費用(JPY/GW)、 $OMC(t)$ は変換機器 t の運転維持費(JPY/GW)、 $FLC(i)$ は資源 i の燃料費(JPY/GJ)、 $Cap(i, t)$ は変数で機器容量(GW)である。

$E(i, t)$ は、変換機器 t に投入する資源 i のエネルギー量(GJ)で(5)式のように表すことができる。

$$E(i, t) = \sum_j Cap(i, t) \cdot cf(t, j) / \eta(t, j) \cdot 8760 \cdot 3600 \quad (5)$$

ここで、 $cf(t, j)$ は変換機器 t の設備利用率、 $\eta(t, j)$ は変換機器 t の機器効率である。

以下に制約条件を示す。

(6)式は需給バランスを表す。エネルギー供給量 $G(t, j)$ は(7)式で表すことができる。 $D(j)$ は、エネルギーキャリア j の需要量(GJ)である。

$$\sum_j G(t, j) \geq D(j) \quad (6)$$

$$G(t, j) = \sum_i Cap(i, t) \cdot cf(t, j) \cdot 8760 \cdot 3600 \quad (7)$$

(8)式は資源賦存量についての制約条件で、エネルギー投入量の最大値は地域内の資源賦存量とする。 $P(i)$ は、資源 i の賦存量(GJ)である。

$$P(i) \geq \sum_j E(i, t) \quad (8)$$

(9)式にCO₂排出量の制約を示す。CO_{2_max}は、(10)式に示すように、BAUケースのCO₂排出量から10%ずつ小さくしていき、感度分析を行う。CO₂ $f(i)$ は、CO₂排出係数(t-CO₂/GJ)、 n は0から10までの整数である。

$$\sum_i \sum_t E(i, t) \cdot CO_2 f(i) \leq CO_{2_max} \quad (9)$$

$$CO_{2_max} = CO_{2_BAU} \cdot (1.0 - 0.1 \cdot n) \quad (10)$$

b) 経済波及効果最大化

次に、地域への経済波及効果最大化を目的関数として最適化計算を行う。経済波及効果の算出には、平成17年福島県相双地域15部門産業連関表²⁾を利用する。なお本研究では、輸入を内生化した競争輸入型モデルを採用し、対象地域の産業構造は変わらないものとして解析を進める。

目的関数は(11)式で表される各産業への経済波及効果の総額であり、産業 k の経済波及効果 $x(k)$ は(12)式で表される。 $M(k, l)$ は、経済波及効果の算出に用いる逆行列係数、 $FD(l)$ は産業 l の最終需要(JPY)である。

$$\max \quad X = \sum_k x(k) \quad (11)$$

$$x(k) = \sum_l M(k, l) \cdot FD(l) \quad (12)$$

以下に示す5つの産業部門の最終需要 $FD(l)$ は、(13)～(17)式のように、初期費用、運転維持費、燃料費より求められる。その他の産業の最終需要は0とする。

$$FD(\text{"機械"}) = 0.75 \cdot \sum_t SCC(t) \quad (13)$$

$$FD(\text{"建設業"}) = 0.25 \cdot \sum_t SCC(t) \quad (14)$$

$$FD(\text{"インフラ"}) = \sum_t OMC(t) + FLC(\text{"系統電力"}) \quad (15)$$

$$FD(\text{"木製品"}) = FLC(\text{"木質バイオマス"}) \quad (16)$$

$$FD(\text{"石油製品"}) = FLC(\text{"LPG"}) + FLC(\text{"灯油"}) + FLC(\text{"都市ガス"}) \quad (17)$$

以下に制約条件を示す。

需給バランスについては(18)式に示す通り、需要と供給を一致させる。

$$\sum_j G(t, j) = D(j) \quad (18)$$

資源賦存量についての制約は(8)式を同様に用いる。また、(19)式の通りコストの制約条件を加える。コストの最大値 C_{max} は(20)式のように整数 n' を変化させ、感度分析を行う。 n' は1以上の整数であり、CO₂排出量が0になった時点で解析を終了する。

$$C_{total} \leq C_{max} \quad (19)$$

$$C_{max} = C_{BAU} \cdot n' \quad (20)$$

3. 解析結果および考察

(1) コスト最小化

CO₂排出量の制約を変化させたときの電力供給構成の変化を図-2に、熱供給構成の変化を図-3に、総コストの構成の変化を図-4に示す。

発電構成は、CO₂制約がきびしくなるにつれて系統電力が減っていき、風力が増加している。CO₂制約がBAUケースの30%になったとき、風力は地域内賦存量の最大値を超えたため、次に発電単価の安い産業用太陽光発電が導入された。

一方、熱部門はCO₂制約がBAUケースの30%になるまで構成はほぼ変化がなく、再生可能エネルギーの中で単価の安い木質バイオマスボイラが一定の割合、その他は化石燃料でまかなわれている。これは、電力部門で風力発電が随時導入されることでCO₂が削減されているため、熱部門ではCO₂排出量を削減する必要がないからだと考えられる。CO₂制約が20%になったとき発電部門ではこれ以上CO₂排出量を削減できないため、灯油よりもCO₂排出量の少ないLPGが導入された。さらにCO₂制約が10%になると産業用太陽熱集熱器が導入された。

図-4にある総コストについては、CO₂制約が20%まではCO₂制約の変化とともにほぼ比例するように増加している。10%になったとき、産業用太陽熱集熱器が導入されたことで総コストが急激に増加した。構成の中では、風車と産業用太陽熱集熱器に係るコストが大きな割合を占めている。

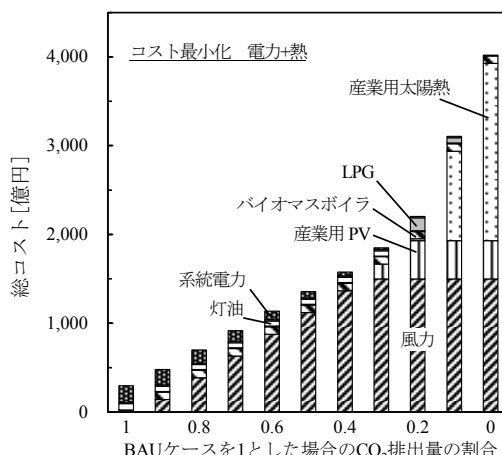


図-4 CO₂制約とコスト構成との関係

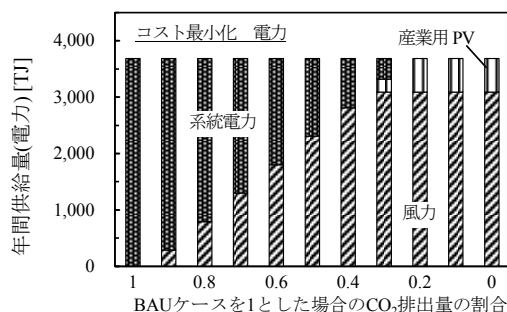


図-2 CO₂制約下における電力供給構成の変化

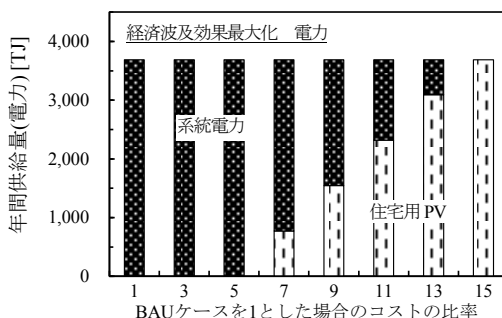


図-5 コストの変化に伴う電力供給構成の変化

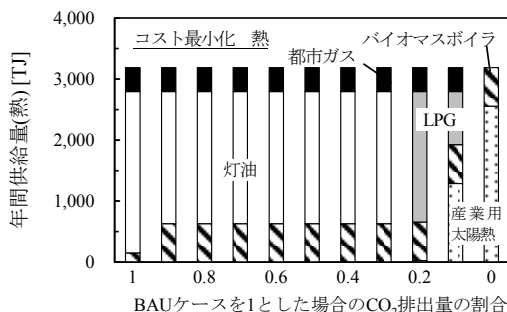


図-3 CO₂制約下における熱供給構成の変化

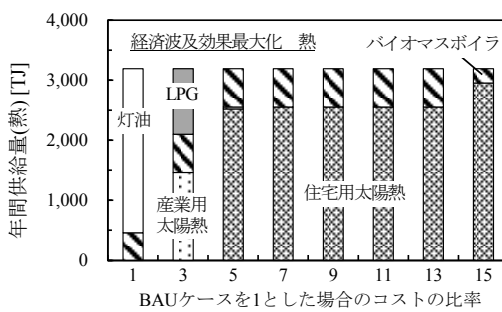


図-6 コストの変化に伴う熱供給構成の変化

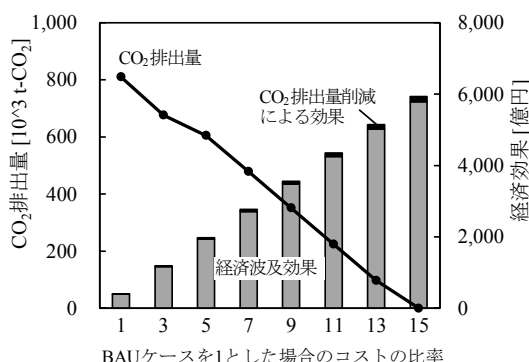


図-7 コストの変化に伴う経済波及効果とCO₂排出量の変化

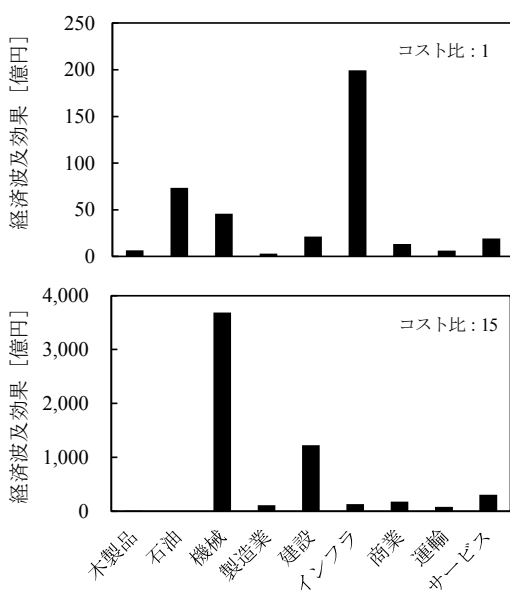


図-8 業種別経済波及効果

CO₂制約が50%のとき、総コストはBAUケースの約4倍の1,355億円、0%のときは約12倍の4,018億円となった。CO₂制約がきつくなるほどコストは高くなるが、地域資源を有効利用していることがわかる。CO₂排出量が0のシステムでもコストは現状の10倍程度であるので、補助金を利用したり、再生可能エネルギーに対するインセンティブをあたえたりすれば、実際に地域の資源を利用するエネルギー技術を導入することは可能であるとする。

(2) 経済波及効果最大化

コストの変化に伴う電力供給量の構成変化を図-5に、熱供給量の構成変化を図-6に示す。総コストがBAUケースの15倍となったときにCO₂排出量が0となった。電力部門では、総コストがBAUケースの7倍となったときに住

宅用PVが導入され、その割合が増加していった。熱部門では、総コストがBAUケースの3倍のとき、灯油に代わりLPGと産業用太陽熱が導入されたが、その後は住宅用太陽熱とバイオマスボイラの構成になった。

コストの変化と経済効果およびCO₂排出量との関係を図-7に、コスト比が1と15の場合の業種別経済波及効果のグラフを図-8に示す。なお図-7のグラフでは、新規需要による経済波及効果に加えて、BAUケースと比較したCO₂排出量の削減による効果を金銭価値に換算して示している。CO₂価格は140 (US\$/t-CO₂)³⁾を引用した。コストが大きくなるにつれて経済波及効果は大きくなり、CO₂排出量は減少している。総コストがBAUケースの15倍のとき、CO₂排出量は0であり、新規需要額が4,911億円に対して経済波及効果は5,789億円であった。経済波及効果は新規需要額の約1.2倍得られる。図-8より、総コストが小さく、CO₂排出量が多いシステム構成の場合は、インフラ産業や石油産業への経済波及効果が大きいが、CO₂排出量が0であるシステム構成の場合は機械産業や建設業への経済波及効果が大きいことがわかる。

4. 結言

本研究では、地域内に賦存する資源を有効利用したエネルギーシステムモデルを試設計し、コスト最小化と経済波及効果最大化を目的関数とした2パターン of 最適化計算を行い、経済性や環境性について評価した。

コスト最小化を目的関数とする解析では、CO₂排出量が0のときのシステムは風力、産業用PV、産業用太陽熱、バイオマスボイラが選択され、総コストはBAUケースの約12倍となる4,018億円となった。一方、経済波及効果最大化を目的関数とする解析では、CO₂排出量が0のときのシステムは風力、住宅用PV、住宅用太陽熱、バイオマスボイラが選択され、総コストはBAUケースの15倍となる4,911億円で経済波及効果は5,789億円となった。

CO₂排出量を抑えようとするコストが高くなるという、環境性と経済性との間にはトレードオフの関係がある。しかし、地域資源を有効利用することで地域経済が活性化され、持続可能な社会システムを構築できることがわかった。このようなシステムを取り入れることができれば、輸入燃料に依存する現在のシステムから脱却し、外部要因に対する頑強性を持った社会をつくることができるだろう。

謝辞：本研究を進めるにあたり、大場真氏をはじめ国立環境研究所の皆様には貴重な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

付録 平成17年福島県相双地域15部門分類産業連関表

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
		agr	min	fod	wod	oil	mec	man	con	inf	com	trs	tel	off	ser	oth	内生部門計	域内生産額
1	agr	7,067	9	4,137	873	1	0	544	260	0	14	0	0	2	1,567	0	14,474	50,764
2	min	2	6	0	118	27	5	974	2,062	162,989	0	0	0	0	21	6	166,210	4,735
3	fod	5,586	0	3,053	21	0	0	286	0	0	12	0	0	8	6,571	49	15,586	19,963
4	wod	642	20	386	6,900	0	577	3,071	6,595	2,624	836	142	53	177	1,626	253	23,902	26,676
5	oil	867	39	170	212	119	429	1,262	2,421	54,919	264	10,917	15	585	1,657	320	74,196	485
6	mec	217	16	0	46	0	38,173	609	2,621	98	117	271	20	969	10,544	37	53,738	133,335
7	man	3,190	286	1,737	2,820	38	17,077	37,925	35,396	14,177	3,009	500	197	2,107	18,883	1,344	138,686	116,802
8	con	51	7	6	49	1	167	272	60	44,527	1,061	55	14	282	358	0	46,910	155,358
9	inf	430	341	334	2,246	10	2,611	2,699	1,487	81,872	2,818	607	144	3,039	8,612	414	107,664	1,507,678
10	com	2,732	440	1,890	3,636	49	8,474	10,088	8,085	85,564	12,726	6,983	286	1,304	18,259	3,883	164,399	219,899
11	trs	3,647	908	735	1,445	35	2,562	4,965	8,148	28,709	6,102	7,564	376	2,630	6,965	1,283	76,074	64,382
12	tel	116	99	72	178	3	1,472	1,439	2,235	28,575	5,467	545	889	2,563	8,120	358	52,131	9,979
13	off	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,924	1,924	62,359
14	ser	761	426	772	728	26	17,863	9,794	11,251	195,047	10,336	13,476	1,452	3,977	19,066	1,991	286,966	264,562
15	oth	523	78	106	252	5	518	451	3,293	6,391	756	221	67	16	1,871	0	14,548	12,564
	内生部門計	25,831	2,675	13,398	19,524	314	89,928	74,379	83,914	705,492	43,518	41,281	3,513	17,659	104,120	11,862	1,237,408	2,649,541
	域内生産額	50,764	4,735	19,963	26,676	485	133,335	116,802	155,358	1,507,678	219,899	64,382	9,979	62,359	264,562	12,564	2,649,541	

<産業部門略名>

agr: 農林水産業 min: 工業 fod: 飲食料品
wod: 木製品 oil: 石油・石炭製品 mec: 機械
man: 製造業 con: 建設 inf: インフラ
com: 商業・金融 trs: 運輸 tel: 情報通信
off: 公務 ser: サービス oth: 分類不明

参考文献

- 1) 福島県農林水産部森林計画課：福島県森林計画図 GIS データ，2012.
- 2) 福島県統計課：平成 17 年度相双地域 36 部門分類産業連関表，2005.
- 3) IEA: World Energy Outlook 2014, 2014
- 4) Akomono Omu, et al. : Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming, Energy Policy 61 (2013) 249-266, 2013.
- 5) 井出眞弘：Excel による産業連関分析入門，産能大学出版部，2003.

(2015. 7. 16 受付)

PRELIMINARY DESIGN OF OPTIMAL ENERGY SYSTEM IN LOCAL AREA CONSIDERING ECONOMIC AND RESOURCE CIRCULATION

Minami KIKUCHI, Takaaki FURUBAYASHI and Toshihiko NAKATA

The objective of this study is to preliminary design the sustainable energy system and to evaluate the system from economic and environmental view. The objective area is Souma area in Fukushima prefecture. After the serious earthquake was happened in 2011 it became clear the defect of the present energy system in Japan which depends on the imported fossil fuel for almost of the energy demand. In order to make the sustainable society, we have to leave off the present system and utilize the renewable energy existing in local area. In this study, first, energy demand and resource potential are estimated using GIS. The local resources are wind, solar and woody biomass. Second, two optimization model is calculated using estimated data which objective function are minimizing the total cost and maximizing the total amount of economic ripple effect. If the CO₂ emission is 0 the total cost is about 12 times as the present one as the objective function is minimizing cost. In the same way the total cost is a 15 times as the present one and the amount of economic effect is about 1.2 times as the amount of final demand as the objective function is maximizing economic effect. The energy system without CO₂ emission takes much cost. However the local economy could be revitalized if the local resource is utilized.