長期的な土地利用シナリオを考慮した 地域エネルギー資源活用策の評価手法

戸川 卓哉¹・藤田 壮²・谷口 知史³・藤井 実²・平野 勇二郎²

¹正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
E-mail:togawa.takuya@nies.go.jp

²正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³非会員 アバンアソシエイツ (〒150-0002 東京都渋谷区1-11-8 渋谷パークプラザ)

エネルギー制約が厳しさを増す中、地域に賦存する固有のエネルギー資源（未利用エネルギー・再生可能エネルギー）の有効活用が課題となっている。本研究では、長期的観点から未利用熱源を核とした地域エネルギー供給策の評価を行うため、需要主体の立地パターンを選択的に設定し、エネルギー政策が地域に与えるインパクトを定量評価するフレームワークを構築した。

東日本大震災による被災都市である福島県・新地町を対象として、地域エネルギー資源の一つである火力発電所排熱を回収し有効活用する施策の検討を行った。その結果、有効な土地の利用策が見いだされていない津波浸水区域における植物工場等のエネルギー集約型産業の新規立地可能性を評価し、現況都市構造との比較から土地利用政策・産業誘致策等の方向性について分析を行った。

Key Words : *unutilized energy, land use, thermal power plant, disaster revitalization*

1. はじめに

東日本大震災を契機として、日本のエネルギー政策はターニングポイントを迎えている。原子力発電のリスクが顕在化したため、再生可能エネルギー・未利用エネルギーへの期待が急激に高まるとともに、短期的には稼働率の上昇した火力発電のエネルギー効率・CO₂排出量削減が喫緊の課題となっている。

一方、未利用エネルギーの利用率の低さと、ポテンシャルの高さが指摘されている¹⁾。未利用エネルギーとは一定の利用価値を有しつつも、様々な要因で廃棄されているエネルギーのことである。このような廃棄が行われる背景には、異なる主体間でエネルギー融通をすることに対する心理的抵抗や、需給地点間の空間的なミスマッチ等が考えられる。特に、長期的観点から施策効果が十分に定量評価されてこなかったことも阻害要因の一つと考えられる。

また、未利用エネルギー源は空間的に偏在している傾向が見られるため、未利用エネルギーの有効活用が実現した場合、エネルギー供給に掛かる限界費用が空間的に

不均一化する。さらに、社会厚生水準を最大化する観点からは、限界費用による価格設定が望ましいため、エネルギー調達コストも空間的に不均一化することが予想される（この点は第3章において議論する）。エネルギー需要の価格弾力性は短期で約-0.2、長期で約-0.5程度と推定されている^{2,3)}。この値は無視できない大きさであり、このことは、長期的にはエネルギーコストの変化に応じた需要側の調整が進むことを示唆する。

このことより、長期的観点から未利用エネルギー評価のためには、既存の立地主体のエネルギー費用削減や環境負荷低減のみではなく、生産・消費行動の構造的な変化や、安価なエネルギーを求めて未利用エネルギー源の周辺に立地する可能性のある新規主体の立地・消費行動の考慮が必要である。

また、急激な人口減少・少子高齢化に直面する多くの地方自治体にとって、地域に賦存する固有のエネルギー資源を有効活用した地域活性化の方法を検討することが、エネルギー制約が顕在化する現在の状況下では、地域活性化のための有効手段の一つに位置づけられる。

しかしながら、第2章でも述べるように、地域エネルギーに関する既往研究の多くは、現況の需要構造を対象とした短期的・静的な分析に留まっており、評価指標も低炭素性に集中している。特に、エネルギー利用の観点から都市・地域をどのように誘導していくべきかという視点が十分に検討されていない。

そこで本研究では、長期的観点から、立地主体の生産・消費行動を考慮した土地利用シナリオの評価手法の開発を行い、エネルギー政策が地域に与えるインパクトを包括的に定量評価するフレームワークを設計し、地域エネルギー供給の観点から望ましい土地利用パターンについて検討する。

また、東日本大震災による津波被害により浸水した地区では、有効な土地の利用策が未だ見いだされていない。このような状況を考慮し、復興支援の観点から、福島県・新地町を対象として、地域エネルギー資源の有効活用による、津波被害地域におけるエネルギー集約型産業の新たな事業展開可能性に関する考察を行う。

まず、第2章で既往研究のレビューに基づき本研究の位置づけを述べた後、第3章では分析のフレームワークを整理する。第4章と第5章でそれぞれエネルギー供給側モデル・需要側モデルの構築を行い、第6章では、それらのモデルを用い、福島県・新地町を対象としたケーススタディを行う。最後に、第7章でまとめと今後の課題を整理する。

2. 本研究の位置づけ

(1) 既往研究のレビュー

本節では、空間情報（土地利用パターン）を考慮した、地域エネルギー供給方策の検討事例についてレビューを行い本研究の特徴について明らかにする。

既往研究⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾では、具体的な都市・地域を対象とした地域エネルギー供給方策の分析を実施しているが、現況の土地利用（需要パターン）を基準とした、エネルギー供給策の検討に主眼がある。近年では、災害リスクや自然環境保全の観点と同様に、再生可能エネルギーの利用可能性を住宅地開発における適地選定に考慮することの重要性についての指摘⁸⁾や、バイオマス賦存量を評価することで、発電所適地の選定に関する検討⁹⁾が行われている。このような検討は、エネルギー供給特性に合わせて、土地利用を計画することの重要性に関する指摘であるが、多様な土地利用パターンを考慮した検討は十分に行われていない。特に、前章でも述べたように、基幹的なエネルギーインフラを整備した場合、長期的には需要側では立地変更を含めた調整が行われると考えられるが、既往研究においては、その観点の考慮は十分に行わ

図-1 福島県・新地町の概要

れていない。そこで本研究では、都市構造・立地パターンの変更を考慮した、中・長期的視点からの評価・分析を実施する。また、評価の視点もエネルギー消費量やCO₂排出量等の環境便益を基本としつつ、政策が地域に与える包括的な分析を行う。

(2) ケーススタディエリアの概要

本研究では、ケーススタディエリアとして福島県・新地町を取り上げる。その概要を図-1に示す。新地町は同県の北部・宮城県との県境に位置する、人口約8,000人の自治体である。2機の100万kW級の発電機を持つ火力発電所が町内南部に位置する工業団地に立地している。さらに、LNG基地の建設が計画されており、エネルギー拠点としてのポテンシャルを有している。

また、東日本大震災による被災地域であり、同町の死者数は116人、全壊住宅棟数は548であった。津波による浸水面積は11km²であり、地域全体の24%の土地が浸水したことになる。なお、これらの被害は図-1に示す沿岸部の津波浸水区域で集中的に発生している。復興においては、住宅移転の具体的な規模・位置や土地利用を含む計画の検討も進み、復旧段階から復興・再生段階に入りつつある。また、津波で被災を受けた土地の多くが農家であり、従来の耕作は難しいことも関連し、復興計画の中では植物工場進出が具体的に検討されている。その一方で、津波被災地域の跡地利用が検討課題として残されている。

3. 評価フレームワークの提案

本章では、次章以降の実証的な分析に先立ち、まず地域エネルギー供給政策の地域への効果・影響を整理し、分析に必要なフレームワークについて明らかにする。

(1) 長期評価のために必要な視点の整理

本節では、地域エネルギーシステムが供用された後、地域に起こる変化について時系列的に整理することで評価フレームに求められる要件について考察する。図-2にその概要を示す。地域エネルギー施策が実施された場合、事業者もある程度は競争的に参入することが予想されることから、エネルギー価格については、代替選択肢となる通常システムによる供給価格と比較して安価に提供される。したがって、エネルギーコストが低下したことにより、エネルギー需要主体のエネルギー需要量は増加すると同時に、既存の産業の生産量や住民の効用水準も上昇する。長期的には、安価なエネルギーを求めて、地域エネルギーシステムによる供給エリアには、新たな産業や住宅・オフィスが立地することが考えられる。このことにより、地域全体での産業の生産量や住民の効用水準はさらに上昇するものと考えられる。

また、エネルギー需要そのものは増加するものの、エネルギー供給源が未利用エネルギーであるため、CO₂排出量も減少することが期待される。ただし、未利用エネルギーを顕在化させるプロセスではCO₂が発生する場合もあるので、全体のバランスの確認が必要である。

(2) 環境・エネルギー政策の評価指標

以上より、地域エネルギー事業の評価はエネルギー価格が変化したことによる、立地を含む需給が調整された後の地域全体に波及する便益の増分と環境負荷の削減分で評価されるべきと考えられる。つまり、環境・エネルギー政策の評価は環境的価値（CO₂排出量等）の評価に焦点が置かれがちであるが、地域活性化効果等の経済価値との両面からの評価が必要である。

また、理想的には、経済活動を行う主体は、その土地において、ゼロ以上の利潤を上げることが可能であれば、その土地に立地する。この結果、長期的には最も効率的な都市空間構造に自発的に到達することが期待される。しかしながら、現実的には様々な摩擦や規制により、最適な土地利用パターンは実現出来ないため、いくつかの典型的な土地利用パターンを外生的に与え比較評価することが重要となる。したがって、環境・エネルギー政策の評価指標は以下の項目により構成されると考えられる。

a) 経済価値の評価方法

地区ごとの立地主体が、地域エネルギー事業により新たに利用可能となった賦存エネルギー資源を活用することによって、享受する生産・効用水準の上昇分を評価する。経済活動により各地区において生み出された価値から土地以外の投入要素に支払われた費用を差し引いた値が、土地に帰着する（地代（年間の土地のレンタル費用）として地主に支払われる）ものと考えて評価する。

図-2 地域エネルギー施策の効果の捉え方

図-3 提案評価システムのフロー

b) 環境価値の評価方法

生産・生活により発生するCO₂排出量のうち、エネルギーを起源とするものを推計する。地域エネルギー供給により削減される部分を評価する一方、エネルギー搬送や熱供給源（火力発電所）における発電損失に伴い発生する部分を考慮する必要がある。

(3) 地域エネルギー政策評価システムの提案

長期的な観点から、エネルギー政策の評価を行うため、エネルギー供給コストの空間分布推計を行うと同時に、エネルギーコストの変化に応じた立地主体の行動をモデル化する必要がある。提案するフレームワークの概念図を図-3に示す。具体的には以下の手順により評価する。

- まず、エネルギー供給システムの設計条件・特性に基づき、エネルギー供給コストとエネルギーを消費することにより発生する環境負荷の原単位の空間分布を推計しポテンシャルマップとして整備する。
- 次に、立地主体のエネルギーコストに応じた生産・消費行動モデルを構築し、実データに基づきパラメータを特定することで、エネルギーコストの変化が生産活動・消費活動および環境負荷排出量に与える影響を分析可能なシステムを構築する。

- さらに、実空間情報や将来計画情報等に基づき、土地利用パターンを設定して、地域全体の社会的便益および環境負荷を評価する。(シナリオ設計)
- 以上により構築した土地利用パターンの変化を考慮可能なモデルシステムにより、エネルギー施策実施時に得られる便益と環境負荷(CO₂排出量)の観点から望ましい都市空間構造について分析する。

4. コスト・環境負荷ポテンシャルマップの導出

(1) コスト・環境負荷の評価インベントリ

地域熱源(火力発電所)を活用して、各需要地点(各グリッド)における一単位のエネルギー需要を賄うために必要なコストとCO₂排出量の推計方法について述べる。

火力発電所排熱を用いたエネルギー供給にかかるコスト・CO₂排出量は発電所における蒸気抽出に伴う費用・CO₂排出量と、そのエネルギーを消費地まで搬送することに掛かる費用・CO₂排出量である。表-1に評価インベントリの概要をまとめる。ただし、蒸気による熱エネルギー搬送は距離減衰を伴うため、需要地点において一単位のエネルギーを供給するためには、供給端である発電所において、一単位以上のエネルギーを抽出する必要がある点に注意が必要である。

また、導管の入れ替えに伴う環境負荷は、筆者らが行った既往研究¹⁰⁾によると78(kg-CO₂/m/年)程度であり、この値は発電量低下・搬送動力に関して想定されるCO₂排出量と比較して微小な値である。また、一時点(地面掘削時)に発生する値を年間値に変換する標準的な方法も存在しないため、本研究ではインフラ建設に伴う環境負荷は評価対象外とした。

(2) 設定条件

a) 基本条件

本研究では、200℃の蒸気を活用した地域熱供給システムについて分析を実施する。以降では、発電所より距離*l*(m)の地点の任意の500メートル四方のグリッド*i*を対象に考察を行う。熱導管ネットワークは地理的な制約を考慮して、対象地域において建設予定のLNGパイプラインに沿って幹線が整備されるものとする(図-1参照)。さらに、熱供給事業を実施する各需要地はグリッドごとに最も近い幹線上のポイントに支線を接続し熱の供給を受けるものとする。なお、本研究では長期的評価に主眼があるため、需要側設備に関しては、新規建設・建物更新時に機器・設備が導入されるとの想定の下、代替物に掛かるコスト・環境負荷と相殺されると仮定し、各メッシュ内の設備は考慮していない。また、火力発電所から蒸気を抽出する場合、抽気タービンへの置き換えが

表-1 コスト・CO₂評価のインベントリ

		コスト Yen/MJ	環境負荷 kg-CO ₂ /MJ
供給端(発電所)	発電量低下	C_{PP}	E_{PP}
熱導管	搬送動力	C_{PM}	E_{PM}
ネットワーク	インフラ建設	C_{IF}	—

必要になりコスト増の一要因となることや、蒸気抽出により復水器での熱交換量が減少するため、海水の循環ポンプの動力が削減される効果等が考えられるが本研究では未考慮である。

b) 熱搬送に伴う損失の評価

熱の長距離搬送に伴う損失を評価する。既往研究¹¹⁾に基づき、微小区間 dx での管内水温 T についての熱バランスは式(1)により表されるとし、これを管長 l に渡って積分することで、搬送に伴う熱損失 Q_{LS} (MJ/hour)を評価する式(2)を得ることが出来る。

$$cG_s \frac{dT}{dx} = \pi DK (T_{out} - T) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q_{LS} &= cG_s (T_s - T_d) \\ &= cG_s (T_s - T_{out}) \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\pi DK l}{cG_s}\right)} \right\} \times 60 \times 60 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 T_s は供給端での蒸気温度(200℃)、 T_d は需要端での蒸気温度、 T_{out} は配管周囲の温度(20℃)、 G_s は蒸気の流量(kg/s)、 c は蒸気の比熱(MJ/kg/K)、 K は熱通過率(断熱材0.040 W/m/K、厚さ0.09 m)を表す。 D は管径(m)を表し、平均流速が一定($v=1$ m/s)になるように設計するものとする。

$$G_s = \frac{Q}{Q_{steam}} \times \frac{1}{60 \times 60} \quad (3)$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{G_s}{\gamma \pi v}} \quad (4)$$

ここで、 Q_{steam} は単位蒸気量あたりの利用可能熱量(2.749 MJ/kg)、 γ は蒸気密度(0.372 kg/m³)を表す。なお、これらの値は200℃の蒸気(圧力0.1MPa、比エンタルピー2833 kJ/kg)が20℃のドレイン(比エンタルピー84 kJ/kg)に変換されるまで利用することを想定して計算している。また、一単位のエネルギー Q を需要地点に到達させるために必要なエネルギー量は $Q + Q_{LS}$ となり、熱源からの搬送距離 l が長くなるほど、供給端において抽出する必要があるエネルギー量が増加する。

(3) 火力発電所(エネルギー供給端)モデル

地域エネルギー供給事業実施に伴い火力発電所で追加的に発生するコストと環境負荷を評価するために、その挙動をモデル化する。石炭火力発電所のシステムフロー

The diagram illustrates the process of a coal-fired power plant. It shows the flow of coal (石炭) into a boiler (ボイラー), which produces steam (蒸気). The steam drives a turbine (タービン), which is connected to a generator (発電機) to produce electricity (発電 電力). The turbine also drives a condenser (復水器), which cools the steam back into water. The condenser is cooled by a cooling tower (排熱). The entire system is labeled as a coal-fired power plant (石炭火力発電所). The diagram also shows the release of exhaust gases (排ガス) and the transfer of heat to the city (都市へ熱供給) at different stages: from the boiler (中温 (100~130℃)), from the condenser (高温 (100℃)), and from the cooling tower (低温).

のエンタルピーあたりの発電量の差を表しており、つまり熱供給に伴う発電効率の低下分を意味する（右辺第1項）。一方、 $1 - \alpha(T_3)$ はエンタルピーあたりの熱エネルギーとして供給される割合を示している。したがって、この値で必要熱量を除すことで地域熱供給に必要なエンタルピーが計算できる（右辺第2項）。したがって、第1項と第2項を掛け合わせるにより、発電低下量が評価できる。

$$C_{np} = c_{coal} \times E_{IS} \quad (7)$$

$$E_{pp} = e_{coal} \times E_{LS} \quad (8)$$

(4) 熱導管ネットワークモデル

a) 搬送動力に必要となるコスト・CO₂の評価方法

$$P_{PM} = \frac{g \times G_s \times H}{\eta_p} \times 1000^{-2} \times 60^2 \quad (9)$$

ここで, g は重力加速度 (m/s^2), η_p はポンプ効率 (0.75),

ここで、 T_b はボイラーにより生成される蒸気の温度 (566°C) を、 T_s は取り出す蒸気の温度を表す。式(5)は温度 T_b の物質が温度 T_s になるまでに取り出せる仕事を温度低下によるエンタルピー変化で割ったもので2つの温度差により発電できる理論的最大値を与えるものである。つまり、燃料の燃焼により生成された 566°C の熱エネルギーが設定された温度変化のプロセスを通じて生み出せる単位エンタルピーあたりの最大発電量を評価した式である。火力発電所も熱機関である以上この理論式に従うことになる。本来であれば、この熱エネルギーを受け取った蒸気の性質を基準とした熱機関 (ランキンサイクル等) の発電プロセスの詳細を考慮するべきであるが、本研究では長期的な観点から分析を行うことを目的としているため、将来の技術向上の可能性等を考慮し理論最大値を与える式(5)を利用する。

$$E_{LS} = (x(T_0) - x(T_s)) \times \frac{(Q + Q_{LS})}{1 - x(T_s)} \quad (6)$$

II 405

G_s は流量 (kg/s), H は揚程 (m) を表す。また、ポンプの揚程は以下の式により評価する。

$$H = (1+k) \times l \times R \quad (10)$$

ここで, k は局部抵抗比 (0.4), R は配管の単位長さあたりの摩擦損失 (0.05 mAq/m) を表す。

以上より, 熱導管ネットワークによる搬送に掛かる電力は前節と同様に評価対象とした石炭火力発電所より供給されるものと考え, 費用と環境負荷は次式のように表せる。

$$C_{PM} = c_{coal} \times P_{PM} \quad (11)$$

$$E_{PM} = e_{coal} \times P_{PM} \quad (12)$$

b) 熱導管コストの評価方法

インフラ建設費は, ディスカウントレイト法に基づき熱導管ストックの年間レンタル費用 r_{IF} (Yen/year) を式(13)のように推計する。

$$r_{IF} = \frac{i}{1 - \left(\frac{1}{1+i} \right)^\tau} c_{pp} \times l \quad (13)$$

ここで, l は導管の長さ c_{pp} は導管 1 単位長さあたりの建設コスト (Yen/m), i は利子率 (0.05), τ は耐用年数を表す。さらに, 建設コストは管径 D に依存すると仮定して, 式(3)(4)の関係を考慮することで, 単位エネルギー供給量あたりのコスト C_{IF} (Yen/MJ) に変換する。

$$C_{IF} = \frac{i}{1 - \left(\frac{1}{1+i} \right)^\tau} \theta \times l \quad (14)$$

ここで, 係数 θ は文献¹⁾の設計例を参考に D が 0.50 (m) の場合 c_{pp} が 519 (千円/m) となるように設定した。また, 耐用年数 τ は 17 年と設定した。さらに, 蒸気幹線部分については併走する LNG パイプラインとの共同溝となると考えられるため, c_{pp} が半減すると設定した。

(5) ポテンシャルマップの推計結果

以上の方法に基づき, 火力発電所からの単位エネルギー量あたりの供給コストおよびCO₂排出量の空間分布を推計した結果をそれぞれ図-5・図-6 に示す。ここでは, 対象地域の人口密度を考慮して, 標準値として 500 (MJ/hour) の熱エネルギーを搬送する場合について示す。(その上で, 1MJ あたりの原単位として整備した結果を示している。) コストポテンシャルに関しては, インフラ建設コストが発電低下量・搬送動力に起因する部分と比較して, 大きく寄与するため距離に対して増加していく傾向がある。一方, CO₂ 排出ポテンシャルに関しては, 発電低下量に起因する部分が大きいいため, コストと比較して, 距離に依存せず一定の値を維持する傾向を示す。

その結果, コストポテンシャル分布からは, 重油・灯油・ガス等の代替的なエネルギー源よりも低い価格で供給できる範囲が特定できる。一方, CO₂ 排出ポテンシャル分布については一様に 0.04 (kg-CO₂/MJ) 程度と推計されており, 重油・灯油・ガス等の代替エネルギー源の CO₂ 排出原単位が 0.06~0.07 (kg-CO₂/MJ) 程度であることから, 概ね火力発電所より 10km 圏内に収まる本研究のケーススタディエリア内においては全域で地域エネルギー供給システム導入時に CO₂ 排出削減効果が期待できることになる。

5 立地主体のエネルギー需要行動モデル

地域エネルギー事業実施に伴うエネルギー価格の変化が産業の生産水準や住民の生活 (効用) 水準とエネルギー需要へ与える影響を整合的・一体的に計測するため, 各土地利用用途ごとに立地主体の生産・消費行動モデルを構築する。ここで, エネルギー需要量を計測する理由は, 前章で導いた CO₂ 排出原単位を乗じることで CO₂ 排出量を推計するためである。

土地利用の用途ごとにパラメータの特定を行う。ケーススタディエリアの実情を考慮して, 用途は住居と工場に関して分析を行う。さらに, 通常の工場に加えて, 特

図-5 コストポテンシャルの推計結果

図-6 CO₂ 排出ポテンシャルの推計結果

にエネルギーコストの影響を受けやすいエネルギー集約型産業のうち、本研究でのケーススタディエリアである福島県・新地町で具体的に議論の進んでいる、植物工場についても分析する。

(1) 行動システムの定式化

立地主体として、土地 a と熱エネルギー e と合成財（労働、資本等を合わせた財） z を用いて製品（農作物） y を生産する事業主体を考える。住宅用地の場合は仮想的に住宅サービスを生産して家計に販売する主体の存在を想定する（付録 A）。生産行動の概念図を図-7 に示す。立地地点の地代 r_a 、エネルギー価格 p_e 、合成財価格 p_z とすると、この事業主体は以下の利潤最適化行動を実行すると考えられる。

$$\begin{aligned} \max \pi &= py - (r_a a + p_e e + p_z z) \\ \text{s.t. } y &= f(a, e, z) \end{aligned} \quad (15)$$

ここでは、生産関数 f として式(16)に示すコブダグラス型の関数を設定する。

$$f(a, e, z) = Aa^\alpha e^\beta z^{1-\alpha-\beta} \quad (16)$$

ここで、 A 、 α 、 β はパラメーターを表し、立地主体の類型ごとに異なる値を持つ。生産関数の性質（ α は土地サービスへの支出割合、 β はエネルギーへの支出割合を表すこと）等を用いて、式(15)の最適化問題を解き、各主体が地代 r_a の下で得ることのできる最大利潤を評価すると式(17)のようになる。なお、変数の右上の*は上記のようにいくつかの条件の下で導かれた最適解（この場合は式(15)の制約条件付き最大化問題の解）であることを意味し、以降も同じ記号を用いるものとする。

$$\pi^* = py - r_a^* a p_e^* p_z^{1-\alpha-\beta} y \quad (17)$$

さらに、ゼロ利潤条件を考慮することで、付け値地代 r_a は式(18)のようになる。

$$r_a^* = p^{\frac{1}{\alpha}} p_e^{-\frac{\beta}{\alpha}} p_z^{-\frac{1-\alpha-\beta}{\alpha}} \quad (18)$$

これより、エネルギー価格 p_e が上昇することにより、付け値地代 r_a^* が減少し、反対に、製品価格 p が上昇すると、付け値地代 r_a^* が上昇することが確認できる。

また、各生産要素の価格パラメータに関する需要関数の誘導形の導出が可能となり、エネルギー需要関数は式(19)のようになる。

$$e^* = \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{p^\alpha} p_e^{-\frac{\beta}{\alpha}} p_z^{-\frac{1-\alpha-\beta}{\alpha}} = \frac{\beta}{\alpha} \frac{r_a^*}{p_e} \quad (19)$$

エネルギーコストの低下に伴い、エネルギー需要が増加する関係を示している。

図-7 生産・消費行動モデルの概念図（例：植物工場）

(2) パラメータの特定

以下の方針により、パラメータを特定する。まず、式(18)・(19)を対数変換し定数をまとめることで、それぞれ式(20)・(21)が導出される。

$$\ln r_a^* = C_0 - \frac{\beta}{\alpha} \ln p_e \quad (20)$$

$$\ln e^* = \ln \frac{\beta}{\alpha} + C_0 - \left(\frac{\beta}{\alpha} + 1 \right) \ln p_e \quad (21)$$

ここで、パラメータ C_0 、 α 、 β は式(20)・(21)を連立することにより導出する。

用いたデータは以下の通りである。

- ・ r_a^* （円/㎡/年）：対象地域における公示地価および都道府県地価調査（平成 24 年）のデータを用途別に集計して適用する。住居・工場に関してはそれぞれの系列の用途の平均値を用いる。植物工場に関しては、対象地域で新設の議論が始まっていることから、地域全体の平均程度の地価負担能力があると考え、全用途の平均値を用いる。なお、地価データ（円/㎡）は利子率 5% で地代（円/㎡/年）に変換する。
- ・ e^* （MJ/㎡/年）：住居に関しては、文献¹⁴⁾の給湯・空調の年間熱エネルギー需要量のデータより設定する。工場に関しては新地町の既存企業の実績値より設定する。植物工場に関しては付録 B に示すシミュレーション結果を用いる。
- ・ p_e （円/MJ）：評価対象である地域熱供給システムに対する代替的なエネルギー源として、住居に関しては、灯油と LP ガスを 50% ずつ利用することを想定し、工場・植物工場に関しては、産業用 A 重油の利用を想定する。いずれも、石油情報センターの資料より 2012 年 12 月の値を基準に設定する。

表-2 に設定値とパラメータのキャリブレーションの結果を示す。

(3) 行動システムの挙動について

前節のパラメータ設定に基づき、用途ごとに、エネルギーコスト r_e の変化に対するシステムの挙動を解析する。図-8 にエネルギー価格と付け値地代の関係を、図-9 にエネルギー価格とエネルギー需要の関係（需要曲線）を示す。エネルギー価格が低下すれば、地代が上昇し、エネルギー需要が増加する関係が示されている。

両図に示した白抜きの丸印は現状のエネルギー価格と地代・エネルギー需要の関係を表している。それぞれのプロットの右側では現状のエネルギーシステムの方がコスト的に有利になるため地域エネルギーシステムが各立地主体に採用される可能性は低くなる。住居に比べて、

表-2 設定値とパラメータ推計値

用途	設定値			推計値	
	r_a^* [円/㎡/年]	e^* [MJ/㎡/年]	p_e [円/MJ]	C_0	β/α
住居	1,435	243	3.89	8.16	0.66
工業	1,153	297	2.17	7.48	0.56
植物工場	1,380	537	2.17	7.88	0.84

図-8 地代曲線（エネルギー価格と地代の関係）

図-9 エネルギー需要曲線（価格と需要の関係）

工場・植物工場は現状でも低価格でエネルギーを調達しているため、地域エネルギー供給システムによりメリットを得られる範囲が限定されることになる。

また、式(20)より表-2 に示した β/α の値が大きい立地主体ほど、エネルギーコスト低下による付け値地代上昇効果が大きいことを示している。つまり、この観点からは、 β/α の値が大きい立地主体ほど地域熱源に近接させることによる社会的メリットが大きいことから、植物工場、住居、工場の順に配置することが考えられる。しかしながら、工場はコストメリットが得られる範囲が限られていることや、現実的な制約が他の用途と比較して厳しいことを考慮する必要がある。

比較的リーズナブルな推計結果が得られている地代曲線に対して、エネルギー需要曲線ではエネルギー価格に対する変動が大きく、特に住居・植物工場の曲線の低価格領域において、需要量が急増する傾向を示している。本研究では単純なコブダグラス型の生産・効用関数を仮定しているため、飽和状況等を柔軟に表現できる CES 型関数等への拡張を検討する必要がある。

図-10 土地利用シナリオの基本設定

図-11 土地利用シナリオの設定結果

6. ケーススタディ

(1) 将来の土地利用シナリオの設計

本章では、異なる土地利用パターンの下での地域熱供給事業の効果の差異について検討する。そのために、土地利用再構築案のシナリオ設計を行う。図-10 に示す 100m グリッド (1ha) のメッシュ上でシナリオデザインを行う。なお、基本方針として、東日本大震災の津波浸水区域の住居用途での利用は制限されるものとする。

まず、植物工場を配置したパターンについて設定する。植物工場は現状で農地に利用されている地区にランダムに 50 グリッド配置されると仮定した (シナリオ b)。次に、熱導管幹線の周辺で生活する人口・および産業の割合を現在の水準より増やすことを想定する。この時、図-10 にその一部を示すように火力発電所より 1km ほどの同心円状の層を設定し、同心円内で完結した移動を行うものとする。これは、現況の居住地との近接性やコミュニティのまとまり等を維持するため、できるだけ近距離の熱供給源への移転を想定した結果である。具体的には、各層ごとに熱導管幹線から最も離れている住宅地もしくは工場地を 1 グリッドづつ選択し、それより内側にある農地と入れ替える。ただし、住宅地は津波浸水区域の農地とは入れ替え不可能とする。この操作を入れ替え対象となる農地が無くなるまで繰り返す (シナリオ c)。次に、配置パターンを前章で考察した、エネルギー利用密度等を考慮して工場、植物工場、住居の順に、上記と同様の方法で用途の入れ替えを実施することで、同心円状に整列した場合について設定する (シナリオ d)。以上の土地利用シナリオの設定結果を図-11 に示す。

また、地域エネルギーシステムの供給範囲は図-6 示したコスト・ポテンシャルマップに基づき、重油・ガス・灯油などの既存システムに対して、各用途ごとに地域エネルギーシステムを導入した場合に低コストとなる範囲と設定する。さらに、地域エネルギーシステムの供給範囲における熱エネルギー価格 p_e に関しては限界費用 (図-6 における表示価格) で供給されるものとする。

(2) 評価結果

各シナリオにおける年間総地代の変化を図-12 に示す。推計結果からは、地域エネルギー供給システムによるエネルギー供給が実現した結果、エネルギーコストの低下を通じて、地域内の生産量が増加するため、無対策ケースと比較して地代が約 1.3 倍に上昇している。蒸気幹線周辺への集約をおこなった場合、さらに同心円状に用途整列をした場合は地代上昇効果が段階的に大きくなる傾向 (最大で現況と比較して約 1.4 倍程度) を示している。

次に、各シナリオごとの年間 CO₂ 排出量の変化を図-13 に示す。CO₂ 排出量に関しては、施策実施に伴い上昇す

図-12 総地代の推計結果

図-13 CO₂ 排出量の推計結果

図-14 環境効率性 (総地代 / CO₂ 排出量) の推計結果

図-15 価格設定を変更した場合の環境効率性推計結果

る結果となった。これは、エネルギー価格が低下したことにより、エネルギー需要が増大したことを反映した結果である。地域エネルギーシステムによるエネルギー供給では単位エネルギー当たりの CO₂ 排出原単位においても、既存システムと比較して約 2/3 程度に減少することになるが、エネルギー需要の増加がこの効果をかき消している。これは、本研究の設定では、限界費用によるエ

エネルギー供給を想定していることから、経済価値は最大化されているものの、環境的側面からの配慮が不十分であるためである。この結果は、環境と経済の両立のためには、エネルギー供給価格の適切な設定が重要であることを示唆する。

以上の結果をまとめ、総地代を CO_2 排出量で除した環境効率性を評価した結果を図-14 に示す。環境効率の観点からみても、施策導入時には現況よりも効率性が低下する結果となる。

そこで、エネルギー価格 p_e を現況値(表-2 に示した値)に変化させた場合の分析結果について図-15 に示す。この結果、地域エネルギーシステム導入に伴うコストダウンのメリットは低下する(エネルギー事業者の収入となる差分のみとなる)ものの、需要一定で CO_2 排出原単位が既存システムより低下するため、環境効率が現況よりも改善する結果となった。これより、エネルギー価格を適正化することで、経済価値と環境価値の両立可能性があることがわかる。

(3) 考察

未利用熱エネルギー活用政策は地域活性化および低炭素化ポテンシャルを有するが、そのコントロールが必要である。特に、エネルギー集約型産業はエネルギー価格の低下に対して、大きくエネルギー需要が伸びる可能性があるため、適切な価格設定を通じたコントロールが重要である。また、空間的観点からは、低コストで熱エネルギーを供給できる火力発電所の近傍へエネルギー集約型の産業を配置することが望ましい。図-6 では、津波浸水区域の多くの地域で熱エネルギーが低コストで供給可能であることを示している。適正な価格コントロールのもと当該地区に植物工場が展開していくことが望ましいと考えられる。

7. まとめ

本研究では、地域エネルギー資源の活用策を検討するためのフレームワークを構築し、東日本大震災の被災都市である福島県・新地町を対象としたケーススタディを通じ、火力発電所排熱の有効活用可能性に関する具体的検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

1. 需要側の立地を含む調整作用が起こるような長期的視点から、基幹的な地域エネルギー供給施策の評価に必要な視点を整理した。
2. 未利用エネルギーの供給源である火力発電所の周辺のエネルギー供給ポテンシャルマップを作成し、エネルギーを既存のシステムと比較して、低コスト・低炭素で供給できる地区が広がっていることを

定量的に示した。

3. 実都市でのケーススタディから、地域エネルギー供給策を行った場合、社会的な便益が発生すると同時に、経済活動の活性化を通じた、 CO_2 排出量の増加が起こるものの、適切な価格設定により環境価値と経済価値の両立できる可能性について示した。

また、今後の課題として以下の点が挙げられる。

- ・ 火力発電発電所のモデリングにおいて、エクセルギー効率を用いた概略的評価を行ったが、実態的な発電プロセスを考慮した評価への拡張が必要である。
- ・ 熱エネルギーの供給ネットワークモデルにおいて、熱搬送に関する計算は概略的に取り扱った。導管の選択やネットワークの計画方法等に関する複数のオプションが存在し、それらを組み合わせることにより図-5・図-6 のポテンシャルマップの様相は変化するものと考えられる。今後、熱エネルギーと導管ネットワークのより詳細な性質を考慮した分析を実施する必要がある。
- ・ エネルギー需要行動の定式化に関しては、コブダグラス型の生産関数を使用した。他の関数形と比較し、立地主体(用途)ごとの実態をより適切に反映させる必要がある。
- ・ 植物工場以外のエネルギー集約型産業の新規立地の可能性を検証し、シナリオにおける用途の配置パターンに関してもより複数のバリエーションを検討し、適切な土地利用誘導策を検討する必要がある。特に、人口や産業のトレンドを考慮したシナリオ設計を行う必要がある。

謝辞：本研究は、環境省・環境研究総合推進費 1E-1105 および 2RF-1303 の支援により実施された。また、新地町役場の皆様には本研究を進める上での有益なご助言やデータ提供など、多くの面でご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

付録

A. 住民行動モデルと生産行動の関係

住民行動が生産行動モデル内で矛盾なく表現出ていることに関する考察を行う。住民は土地 a とエネルギー e と合成財(その他のモノ・サービスを合わせた財) z を消費することで、効用を得ると仮定することで、以下のような消費最適化行動を実行するものと考えられる。

$$\begin{aligned} \max u &= u(a, e, z) \\ \text{s.t. } I &= r_a a + p_e e + p_z z \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 I は所得を表し、効用関数 u は以下のようなコ

ブダグラス型を仮定する.

$$u(a, e, z) = Ba^\lambda e^\mu z^{1-\lambda-\mu} \quad (23)$$

さらに, 地域内に居住をとどめるためには, 対象地域の外側に居住した場合に得られる参照効用水準 u_0 以上の効用が享受できる必要があると考え, 付け値地代関数は以下のように導出できる.

$$r_a = u_0^{-1/\lambda} p_e^{-\mu/\lambda} p_z^{-(1-\lambda-\mu)/\lambda} I^{1/\lambda} \quad (24)$$

これより, エネルギー価格 p_e が低下すると地代への支払い可能額が上昇することが分かる. さらに, エネルギー需要関数は式(25)のようになる.

$$\frac{e^*}{a^*} = \frac{\mu}{\lambda} p^\lambda p_e^{-\frac{\mu}{\lambda}-1} p_z^{-\frac{1-\lambda-\mu}{\lambda}} = \frac{\mu}{\lambda} \frac{r_a^*}{p_e} \quad (25)$$

式(18)(19)との比較より, 地代関数・需要関数が生産行動モデルと同型に帰着することが分かる.

B. 植物工場におけるエネルギー需要の推計

本研究では, 太陽光利用型の植物工場を想定する. 対象エリアの気象データに基づき推計した. 推計式は文献¹⁵⁾の方法に従った. 推計のフローは図-16 に, 推計結果は図-17 に示す. 年間に必要となる暖房エネルギーは 537 (MJ/m²) と推計された.

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁: 未利用エネルギー面的活用熱供給導入促進ガイド, (2007)
- 2) 星野 優子: エネルギー需要の長期価格弾力性—政策分析に用いる場合の留意点, 電力中央研究所報告, 研究報告. Y, 1-20, 巻頭 1~3 (2010)
- 3) 星野 優子: 日本のエネルギー需要の価格弾力性の推計—非対称性と需要トレンドの影響を考慮して, 電力中央研究所報告, 研究報告. Y, 1-21, 巻頭 1~3 (2011)
- 4) Yue C. D., Wang S. S.: GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan, Energy Policy, 34, 6, 730-742 (2006)
- 5) Byrne J., Zhou A. M., Shen B., Hughes K.: Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS- and lifecycle cost-based assessment of Western China's options, Energy Policy, 35, 8, 4391-4401 (2007)
- 6) Underwood C. P., Ramachandran J., Giddings R. D., Alwan Z.: Renewable-energy clusters for remote communities, Applied Energy, 84, 6, 579-598 (2007)
- 7) Gormally A. M., Whyatt J. D., Timmis R. J., Pooley C. G.: A

図-16 植物工場のエネルギー需要推計フロー

図-17 植物工場のエネルギー需要推計結果

regional-scale assessment of local renewable energy resources in Cumbria, UK, Energy Policy, (2012)

- 8) Vettorato D., Geneletti D., Zambelli P.: Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements, Cities, 28, 6, 557-566 (2011)
- 9) Arnette Andrew N., Zobel Christopher W.: Spatial analysis of renewable energy potential in the greater southern Appalachian mountains, Renewable Energy, 36, 11, 2785-2798 (2011)
- 10) 鈴木 祐大, 加知 範康, 戸川 卓哉: 環境・経済・社会のトリプル・ボトムラインに基づく都市域の持続可能性評価システムの構築, 地球環境研究論文集, 17, 93-102 (2009)
- 11) 下田 吉之, 柳 邦治, 水野 稔: 熱需要の変動を考慮した清掃工場廃熱活用熱電併給システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 80, 27-35 (2001)
- 12) 環境省: 燃料別の二酸化炭素排出量の例, <http://www.env.go.jp/council/16pol-car/y164-04/mat04.pdf>, (accessed on 7th Aug 2013)
- 13) Imf: Primary Commodity Prices, <http://www.imf.org/external/np/res/commmod/index.aspx>, (accessed on 7th Aug 2013)
- 14) 柏木孝夫, 日本エネルギー学会: 天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008, (2008)
- 15) 関山哲雄: 施設園芸の環境調節と省エネ技術, (2003)

(2013. 8. 9 受付)

AN EVALUATION APPROACH FOR REGIONAL ENERGY SYSTEM PLANNING CONSIDERING LONG TERM LAND USE TRANSITION SCENARIOS

Takuya TOGAWA, Tsuyoshi FUJITA, Tomofumi TANIGUCHI, Minoru FUJII and Yujiro
HIRANO

Under the pressure of exacerbating energy supply condition, effective use of regional original energy source, such as excess energy or renewable energy, has become an important issue. In this study, in order to identify the best available regional energy policy in long-term, we establish a quantitative evaluation approach to address the impact of designed energy policy considering energy consumer's location pattern.

We conducted an effective energy system planning of using exhaust heat from local thermal power plants in the case of Shinchimachi, where is one of the affected areas by the east Japan great earthquake. Furthermore, we evaluated the possibility of energy collective industry location, such as plant factory, to the tsunami flood area where has had no suitable land use pattern yet. Finally we discussed the directivity of land use and industrial invitation policy based on a comparison with present urban structure.