

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24561056

研究課題名(和文)長期エネルギー需給システム計画のための拡張モデル概念と逆問題

研究課題名(英文)Extended Model Concept and its Inverse Problem for Long-term Energy Supply-demand Systems Planning

研究代表者

手塚 哲央 (Tezuka, Tetsuo)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：60163896

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、各種前提条件とその結果として得られる長期エネルギー需給シナリオとの関係を分析・把握するために、まず、前提条件の選択過程をモデルに含めた「拡張モデル」の概念を新たに提案、その関係の理解に有効な、ある特徴を持ったシナリオを最適解として与える前提条件集合を求める「拡張モデルの逆問題」を提案した。そして、その求解のために遺伝的アルゴリズムを用いた近似手法を開発、シミュレーション分析によりその有効性を示した。さらに、前提条件と最適解との因果関係図を描くことにより、シナリオ理解の際の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a new concept of "Extended Model" which additionally includes the process for selecting a variety of assumptions used for developing models. It is indispensable to analyze the relationship between the assumptions and the resultant optimal scenarios (solutions) for understanding the long-term energy supply-demand scenarios. We proposed the method to solve the "inverse problem of the extended model". The inverse problem is solved approximately by applying the genetic algorithm, and its usefulness for understanding the relationship between the assumptions and the resultant scenarios has been demonstrated through simulation studies.

研究分野：エネルギーシステム学

キーワード：逆問題 長期エネルギー需給シナリオ 拡張モデル シナリオ理解 遺伝的アルゴリズム

## 1. 研究開始当初の背景

### 1.1 将来シナリオとその前提条件

ある国の将来において生じる可能性があると考えられるエネルギー需給の状況を、エネルギー利用に関わる技術開発の可能性、エネルギーや金属などの各種資源の利用可能性、国内外の社会の状況やマクロ経済、社会制度、インフラ整備、エネルギー需要など、種々の前提条件と共に記述したものを、エネルギー需給シナリオ(以下、シナリオと呼ぶ)と呼ぶ。一般にそれは予測ではなく、将来のエネルギー需給像を対話的に探るための一つの手段であり、エネルギー政策策定に不可欠のものである。そして、マクロ・ミクロ経済モデル、技術評価モデル、最適化型技術選択モデル等の各種モデル化手法を用いて、従来から多大な努力により作成されてきた。しかしながら、その労力と比べて政策担当者や技術開発に携わる研究者にそのシナリオに関する情報が効果的に伝わっていたとは言えないように思われる。また、近年になって積極的に作成されている技術ロードマップについても、その全体像を政策に反映させるための道筋は曖昧なままである。

一般には通常のモデルに含まれる前提条件は、多岐の項目に渡り簡単に説明できるようなものとはならない。これが、シナリオ表現の際に前提条件の詳細な説明が欠落してしまう理由でもある。しかし、将来シナリオ、特に長期のシナリオについては、前提条件の内容を理解することが、シナリオ理解のためにきわめて大切であることが少なくない。前提条件の中には、モデルで考慮されていることの他に、モデルで考慮されていないことに関するものも重要である。このような「前提条件とモデルのシミュレーション結果であるシナリオとの間の関係を理解すること」、それが、「将来シナリオを理解した」ということになると考えられる。

### 1.2 拡張モデルの提案とその効用

以下では、本研究で対象とする最適化型モデルを用いて説明する。従来のモデルでは、どのように前提条件が選択され(あるいはされず)モデルが構築されているかの情報は、モデルには含まれていなかった。この状況を図1の左側に示す。これに対して、本研究では、図1の右側に示すように、その前提条件の選択過程(前提条件モデル)をもモデルに含めることを提案する。この、前提条件の選択過程をモデルに含めたものを「拡張モデル」と呼ぶ。

ここで重要なことは、前提条件だけではなく、前提条件の選択過程を拡張モデルに含めていることである。将来シナリオにおいて考慮されていない条件についても、考慮されていないという形で前提条件モデルに含めることである。これにより、前提条件の選択結果と将来シナリオとの関係を分析すること

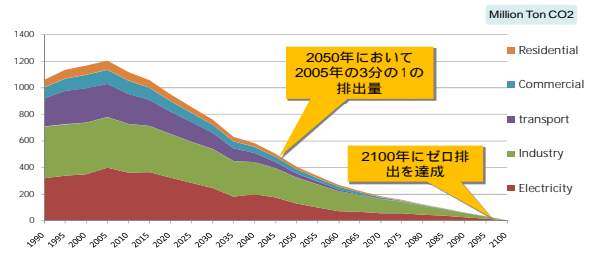


図1 将来エネルギー需給シナリオの表

を主目的としたモデル分析の枠組となる。

### 1.3 拡張モデルと逆問題

拡張モデルを使用することの効用は2つある。一つは、モデルで想定された前提条件、および想定されなかった前提条件の情報を利用者が知ることができること、もう一つは、ある特徴を持ったシナリオを最適化モデルの解として得るための前提条件集合を求めることができることにある。

一般の問題(順問題)では、前提条件を与えてその条件を満足する解を求める。これとは逆に、図2に示すように、ある特徴を有するシナリオ集合を与えて、そのシナリオ集合を解として持つ前提条件の集合を求める問題を「逆問題」と呼ぶ。ただし、図2には最適化型モデルの場合を想定しているが、特に最適化型モデルに限られることはない。

この「拡張モデル」とその「逆問題」の考え方は従来のモデル分析にはなかった新規なものである。将来シナリオについて考える場合、逆問題を利用すると、例えば、次のような問題を検討することができる。

最適解として得られるシナリオ群がある与えられた条件を満足するためには、

- (1) どのような技術開発、制度導入があればよいのか。
- (2) 不可欠な技術、制度・政策はどのようなものか？

例えば、水素自動車技術が最適解に含まれるための前提条件集合を求めるといった問題が、ここでいう「逆問題」に相当する。

この拡張モデルの順問題と逆問題の求解を繰り返すことにより、関係者間での将来シナリオについての理解がより深まるものと期待される。なお、対象の理解を深めるために、複数の視点から対象を眺めることが重要であることは、生態学的認知科学の分野でも確認されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、上で説明した新規な「拡張モデル」の構築とその逆問題求解手法の開発を目的とする。具体的には、以下の内容について研究する。

- (1) 「拡張モデル」における前提条件の集合とその選択過程の表現手法を開発する。

まず、エネルギー需給シナリオ策定の際に

考慮すべき資源、技術、社会、制度などに関わる主要な前提条件を抽出、モデル作成者による条件の選択結果を記録、そして自動的に最適化モデルに反映させる手法を確立する。特に、多期間モデルの前提条件集合については、時間情報、技術や制度間の因果関係を含める必要がある。本研究では、長期モデルの場合、前提条件を離散変数モデルとして表現できると考えられることから、時間ペトリネットを用いた手法について検討する。

(2)「拡張モデルの逆問題」の求解手法を開発する。

所与の特徴を有する将来シナリオを最適解として与える前提条件集合（離散的な条件集合）を求める「拡張モデルの逆問題」に対して、ヒューリスティック解法の一つである遺伝アルゴリズムを用いて求解する手法を開発する。さらに、本手法の効果的な利用方法として、対話的手法について計算機シミュレーションと被験者による実験を併用して検討する。

### 3. 研究の方法（概要）

本研究の内容は以下の4つの段階により構成される

- (1) 拡張モデル、特にその中の前提条件モデルの構築手法の開発
- (2) 拡張モデルの逆問題の求解手法の開発
- (3) 動的な前提条件集合のペトリネット表現とシミュレーション
- (4) ペトリネット表現を用いた拡張モデルの逆問題求解手法の開発
- (5) エネルギー関連分野の専門家の参加による被験者実験による分析・評価

### 4. 研究の成果

#### 4.1 従来型モデルと拡張モデル

前節の考察結果に基づくと、種々の前提条件の有無を表現できる「前提条件モデル」を最適化型モデルに付加したモデルが、将来シナリオの理解のために必要であると考えられる。すなわち、前提条件とその選択過程を前提条件モデルにより表現して、従来から用いられている最適化型モデルと組み合わせるのである（図2参照）。そして、その2つのモデルを組み合わせるものを「拡張モデル」と呼ぶ。拡張モデルのシミュレーションには、前提条件の設定過程も含まれることとなる。

ここで重要なことは、将来シナリオにおいて考慮されていない条件についても、考慮されていないという形で前提条件モデルに含まれるということである。これにより、種々の前提条件の下で最適化モデルをシミュレーションすることが可能となる。そして、そ

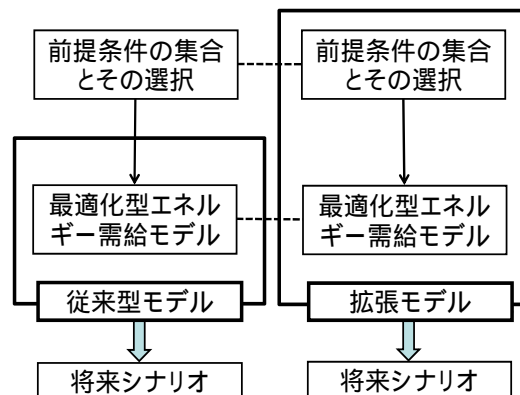


図2 従来型モデルと拡張モデル

の多様な前提条件群の抽出のために、まず、将来シナリオにおいて考慮すべきと考えられる状況（条件）を詳細に記述することが求められる。これは、条件を明確にするとともに、その内容を第三者と共有するという利点ももたらされる。以下の分析については、この前提条件群に関わる記述が十分に準備されていることを前提とする。

なお、長期シナリオ検討のための最適化型モデルの役割は、前提条件を満足する解集合の中で、ある視点から最も妥当と考えられるシナリオを一つ選択することである。長期シナリオ検討の場合には、最適解そのものに意味があると考えられるわけではないことにも留意すべきである。

#### 4.2 逆問題とその解法

一般の問題（順問題）では、前提条件を与えてその条件を満足する解を求める。逆問題とはこの逆の問題であり、図3に示すように、ある特徴を有するシナリオ集合から、そのシナリオ集合を解として持つ前提条件の集合を求めることを指す。図3には最適化モデルの場合を想定しているが、特に最適化モデルに限られることはない。

将来シナリオについて考えている場合、逆問題を利用すると、下記に示すような問題を検討することができると期待できる。

すなわち、最適解として得られるシナリオ群がある条件を満足する場合：

- (1) どのような技術が開発されなければならないのか？また、どのような技術が開発されてはならないのか？
- (2) どのような政策や制度、あるいはその組合せが必要となるのか？

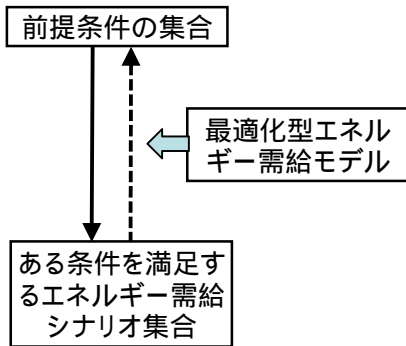


図3 拡張モデルにおける順問題と逆問題

- (3) ある特定の技術群が導入されるためには、技術開発について、どのような条件が満足されなければならないのか？
- (4) ある特定の技術群が導入されるためには、制度設計において、どのような条件が満足されなければならないのか？
- (5) 不可欠な技術は存在するか、また存在するとすればそれは何か？
- (6) 不可欠な制度・政策は存在するか、また存在するとすればそれはどのようなものか？

そして、容易に推察できるように、前述の拡張モデルをこの逆問題の求解に用いることができる。

### 4.3 遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic Algorithm) による逆問題の解法

離散変数を含む問題の求解手法の一つである遺伝的アルゴリズムは、0-1 変数列を遺伝子と捉え、種々の遺伝子配列を持った個体群に対して突然変異や交差などの遺伝子操作 (図4, 図5 参照), および個体の評価に基づく選択を行うことにより、目的とする遺伝子配列 (個体) 群の獲得を目指すものである。詳細については専門書に譲る。

本研究では経済産業省の技術戦略マップから 40 項目を抽出し、その技術要件の可否を前提条件として取り扱う (付録1)。

遺伝的操作の手法としてはエリート選択、単純交叉、突然変異を用いる。一世代の個体数は 30 個とし、そのうちフィットネス関数 (式(1)、(2)) による評価の高いもの 20 個をエリート選択によって選抜し、残り 10 個をエリート選択によって選ばれた個体群から一点交叉によって生成する。さらに、一つの個体の遺伝子配列の内の一つをランダムに選択し、その遺伝子の値 (0,1) を切り替える突然変異操作を 3%の確率で行う。

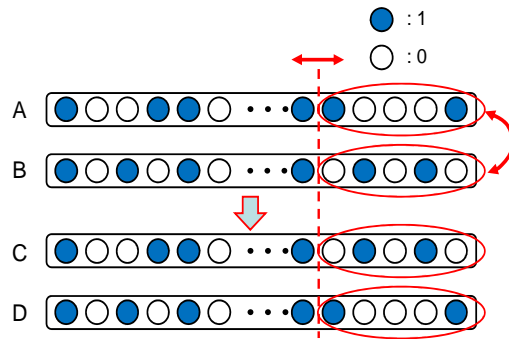


図4 個体間の交差演算

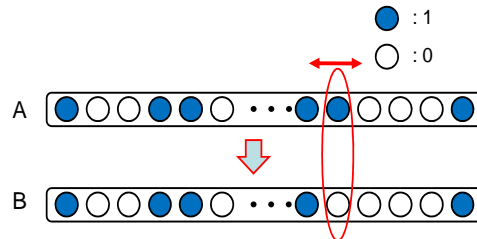


図5 突然変異

$$\frac{E_0 - E}{E_0} > T \text{ の場合} \quad R = 1 \quad (1)$$

$$\text{それ以外の場合} \quad R = \frac{E_0 - E}{E_0} - T \quad (2)$$

ここで

$R$ : フィットネス関数 (評価関数)

$E_0$ : 基準年度 (2005年度) の二酸化炭素排出量

$E$ : 対象年度の二酸化炭素 排出量

$T$ : 削減率の目標値 (%)

### 4.4 シミュレーション結果について

2005 年度の二酸化炭素排出量を基準として削減率 20%, 30%および 40%を達成することを目標として 500 世代の遺伝的操作を実行した結果を表1に示す。

#### (1) 削減目標 40%の場合

二酸化炭素の削減目標が 40%の場合には、前提条件としてすべての技術要件を実現可能としても目標とする削減率をどの個体も達成できず、すべての個体が削減率 36.8%に留まっていた。このことは取り扱った技術要件全てが利用可能になったとしても与えた目標を達成できないときには、最も優れた解に収束することを表しており、ある意味で遺伝的アルゴリズムが有効に働いていると考えられる。

#### (2) 削減目標 30%の場合

削減率 30%の場合にはとりうるシナリオにある程度自由度が生じ、上記のシミュレーシ

表1 個体集合の特徴（シミュレーション結果）

	削減率20%	削減率30%	削減率40%
電気自動車	20%	60%	100%
火力発電効率化	80%	90%	100%
電力貯蔵	90%	100%	100%
ヒートポンプ	30%	80%	100%
交通の進化	85%	83%	100%
太陽光発電	90%	93%	100%
風力発電	90%	100%	100%
バイオマス	50%	56%	100%
原子力発電	76%	93%	100%
目標達成割合	100%	86%	0%

（注）表中の％の値はそれぞれの条件を満たす遺伝子および個体の割合を示す。

シミュレーションの結果では 86%の個体が目標を達成した。上述のシナリオ以外にも電気自動車を普及させず、二酸化炭素の削減分は火力発電の高効率化で十分であるとする個体や、電気自動車ではなくバイオマスによって二酸化炭素の排出削減を目指す個体などが存在することから、遺伝的アルゴリズムのシミュレーションにおいて個体の多様性の維持されることが確認される。

### (3) 削減目標 20%の場合

削減目標値が 20%の場合には、すべての個体が削減目標を達成する。また、各個体において導入可能とすべき技術要件の割合が減少し、更に解の自由度が増えていることが分かる。このように与えられた削減目標に対してエネルギーシステムが余裕を持っている場合、逆問題の求解時に遺伝的アルゴリズムはより大きな多様性を維持できることが確認される。

### 4.5 動的モデルへの展開

対象とするシナリオが複数の年代にわたる場合には、前提条件も複数の年代に関わるものとなる。そして、その条件間に因果関係を伴うこととなる。

例えば、ガソリンや軽油などによる液体燃料自動車が電気自動車に完全に置き換わるためには、バッテリー能力の改善や石油価格の上昇、温室効果ガス排出制約の強化、充電スタンドの普及など、複数の条件が関係することとなる。また、バッテリーの改善のためには、レアアースなどの希少金属資源の利用可能性も関係を持つ。また、その因果関係群の間には、ある程度の時間差を伴う。このよ

うな前提条件群を表現するためには、条件間の因果関係が表現できシミュレーションの容易なモデル表現が望ましい。

その手法としては時間ペトリネットが利用可能な候補の一つと考えられ、個々で用いた手法を容易に適用することが示されている。

### 4.6 シナリオの理解の促進

逆問題の最も重要な効用は、対象となる問題に対する理解の促進である。これは、 $1 + 2 = ?$ という問題の理解は  $+ = 3$ という問題を考えることにより、深められることに対応している。

ここで開発された逆問題求解手法を、このシナリオへの理解の促進へ適用することができる。

具体的には以下の手順による。

- (1) 対象の問題にある程度の知識をもったシナリオ開発者（以下、A と略記）に、ある将来シナリオを提示する。
- (2) その将来シナリオ（例えば、自動車用水素の導入）のための逆問題の条件群の複数の組合せを得る。
- (3) A はその結果から、水素導入のための条件群と最適解との間の定性的因果関係を図式的に把握する。
- (4) そして、その逆問題の解より、自動車用水素導入とAによって選択された、あるパラメータとの間の感度分析を実施する。
- (5) その結果が、Aによる予想通りであるかどうかの判断により、水素導入のための条件群と最適解との間の定性的関係の妥当性を判断する。
- (6) 妥当でないと判断される場合には、逆問題の求解を異なるパラメータ値により実施することにより、因果関係図を更新する。例えば、一つの逆問題の解から特定の変数（例えば水素消費量）が正值の基底変数として留まるための条件を求めることにより、因果関係図を更新することが期待される。

### 4.7 結論と今後の課題

本研究により、ある条件を満たす長期シナリオが最適解として得られる条件を求める逆問題を提案し、その求解手法を考案するとおもに、シミュレーションでその有効性を確認した。また、対象となるシナリオへの理解を深めるための手法としての利用可能性を検討した。

提案手法は、未だ実用規模の問題に適用できるとは言い難いが、条件群を先験的な情報に基づいて限定することにより、今後、政策決定の場でも十分に利用可能な方法論として成長できる可能性を秘めていると考えられる。

## 参考文献

- [1] 京都大学グローバルCOEプログラム、地球温暖化時代のエネルギー科学拠点 - CO2 ゼロエミッションをめざして、<http://www.energy.kyoto-u.ac.jp/gcoe/index.html>
- [2] 技術戦略マップ 2008 経済産業省 産業技術環境局編
- [3] T. Tezuka and Q. Zhang: A Methodology for a Long-term Energy Supply-demand Scenario Analysis, Proceedings of International Conference on Applied Energy (ICAE2010), Singapore, 2010

## 付録1 前提条件モデルで採用した技術要件[2]

- 電気自動車の普及
  - 高効率モーター技術の可否
  - 高密度バッテリーの可否
  - 充電インフラの可否
- 火力発電効率化の可否
  - 超臨界圧石炭火力発電の可否
  - 石炭ガス化複合発電の可否
  - 石炭ガス化燃料電池の可否
  - ガス石油コージェネの可否
  - ガスタービンコージェネの可否
  - 燃料電池コージェネの可否
- 電力貯蔵の可否
  - 高密度バッテリーの可否
  - 大容量キャパシタの可否
- 高性能住宅普及の可否
  - 高断熱住宅普及の可否
  - 高气密住宅普及の可否
- 空調、給湯の効率化の可否
  - 高効率ヒートポンプ空調の可否
  - 超高性能ヒートポンプの可否
  - 高効率ヒートポンプ給湯器の可否
- 交通の高度化の可否
  - 高度道路交通システムの可否
  - 物流モーダルシフトの可否
- 水素利用の可否
  - 固体高分子水電解技術の可否
  - アルカリ水電解技術の可否
  - 固体高分子燃料電池の可否
  - 圧縮水素輸送の可否
  - 液体水素輸送の可否
  - 水素供給スタンド整備の可否
- 太陽光発電の可否
  - 結晶 Si 系太陽電池の可否
  - 薄膜 Si 系太陽電池の可否
  - 化合物結晶系太陽電池の可否
  - 薄膜 CIS 化合物系太陽電池の可否
  - 有機材料系太陽電池の可否
- 風力発電の可否
  - 陸上風力発電の可否
  - 海上風力発電の可否

- バイオマスエネルギーの可否
  - バイオマス資源供給の可否
  - セルロースエタノール化の可否
  - ディーゼル用バイオ燃料の可否
  - ガス化 BTL の可否
- 原子力発電の高度化の可否
  - 軽水炉高度利用化技術の可否
  - 次世代型軽水炉開発の可否
  - 回収ウラン転換前高除染プロセスの可否
  - 高速増殖炉の可否
  - 核燃料サイクルの普及の可否

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- [1] Widodo Wahyu Purwanto, Yoga Wienda Pratama, Yulianto Sulisty Nugroho, Warjitob, Gatot Fatwanto Hertono, Djoni Hartono, Deendarlianto, Tetsuo Tezuka: Multi-objective optimization model for sustainable Indonesian electricity system: Analysis of economic, environment, and adequacy of energy sources, Renewable Energy, Vol. 81, pp.308-318 (2015)
- [2] Daisuke MIURA, Tetsuo TEZUKA: A comparative study of ammonia energy systems as a future energy carrier, with particular reference to vehicle use in Japan, Energy, 68, pp.428-436 (2014)

〔学会発表〕(計 2 件)

- [1] 三浦, 安達, 手塚: アンモニアエネルギーシステムに関する基礎的検討、エネルギー資源学会研究発表会、6月、2012年
- [2] Tetsuo TEZUKA: Future Energy Supply and Demand of Japan -Uncertainty and Planning-, Kyoto University-ETH Symposium, Zurich, 2013

〔その他〕  
ホームページ等

<http://eecon.energy.kyoto-u.ac.jp/top.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

手塚哲央 (テツカテツオ)

研究者番号: 60163896

### (2) 連携研究者

三浦大助 (ミウラダイスケ)