

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

平成 20 年度

修士論文

事業者別価格戦略を考慮した
マルチエージェント型世界エネルギーモデルの開発

2009 年 2 月提出
指導教員 藤井 康正 准教授

076202 笠松 隼樹

目次

第 1 章	序論.....	3
1-1.	研究の背景	3
1-2.	ゲーム理論の世界モデルへの適用.....	4
1-3.	研究目的	7
第 2 章	モデルの概要.....	8
2-1.	世界全体最適化型 DNE21 モデル.....	8
2-2.	DNE21 モデルのマルチエージェント化.....	14
2-3.	DNE21 モデルのマルチエージェント化の細分化.....	17
第 3 章	感度解析による戦略決定.....	25
3-1.	従来の戦略ベクトルの更新方法.....	25
3-2.	感度解析による戦略ベクトルの更新.....	27
第 4 章	計算結果(1).....	35
4-1.	日本国内のエージェントのみが戦略をとるケース.....	35
4-2.	問題点と改善すべき点.....	40
第 5 章	複数の同業者を想定した感度解析.....	41
5-1.	複数の同業者の存在.....	41
5-2.	複数の同業者の存在を考慮した感度解.....	42
5-3.	Kuhn-Tucker 条件の書き換え.....	43
5-4.	最適化問題の作成.....	47
第 6 章	計算結果(2).....	49
6-1.	日本国内のエージェントのみが戦略をとるケース.....	49
6-2.	世界の全てのエージェントが戦略をとるケース.....	59

第7章	結論.....	77
7-1.	まとめ.....	77
7-2.	今後の課題.....	78
謝辞.....		79
参考文献.....		80
発表実績.....		81

第1章 序論

1-1. 研究の背景

1-1-1. 従来の研究

当研究室ではDNE21^[1]に代表されるような地球温暖化対策に主眼を置いた世界全体最適化型エネルギー需給モデルの開発、研究が行われてきた。これらのモデルでは「世界全体でのコスト最適化」が行われるため、世界が一つの意思を共有し、協力することで得られる結果を示すこととなる。地球温暖化の原因とされるCO₂などの温室効果ガスは主に先進国で排出されるが、その影響は途上国を含めた世界全体に及ぶ。従って温室効果ガスによる地球温暖化に対するリスクは世界で共有する必要がある、そういった意味で世界全体最適化型モデルは合理的であったといえる。しかし前述の通り従来のモデルは、世界全体が協力することを想定したものであり各国、地域間での競合は表現できず、各国、地域ごとのエネルギー戦略を評価することは困難であった。

これに対し同研究室の篠原剛氏は地域細分化型世界エネルギーモデルの構築^[2]を行い、地域ごとの特性を考慮したエネルギーバランスの評価を行った。DNE21 モデルにおける各国、各地域をエージェントとしたマルチエージェントモデルの開発が行われ、地域間における競合が表現された状態でのエネルギー戦略が評価できるようになった^[3]。しかし依然地域内における競合を表現することはできていない。（ここで言うエージェントとは意思決定単位のこと、各エージェントは自分自身にかかるエネルギーコストを減少させるように意思決定するものとする）

1-1-2. 事業者単位のエージェント

前節^[3]のマルチエージェント化ではDNE21 モデルの10地域をそれぞれエージェントとみなし、各地域が互いに競合する世界を想定している。これは、現実世界で言えば、各国、各地域の政府機関がその地域内全てのエネルギー・資源計画に対して意思決定している状態であると考えられる。つまり、原油の輸出入、天然ガスや石炭の生産など、その地域内すべての行動決定をそれぞれ一人で行っている状態である。

しかし現実世界では様々なエネルギーサプライヤーが存在し、その多くが自己の利益を追求する民間企業である。同一の地域内に石油を扱う業者、天然ガスを扱う業者、石炭を扱う業者などが混在しており、その地域にかけられる環境制約を共有している。各業者は、その地域全体の利益（報酬関数）が最大になることを必ずしも求めるのではなく、自分自身（自企業）の利益を追求するものと考えられる。つまり、同一地域内でも他業種との競合関係が生じることとなる。例

えば、石油業者は地域内の石油の販売価格を高くし、利益を増やしたいと考えるのに対し、発電事業者は、発電に使用する石油の価格を低くし、自身の利益を増やそうとするだろう。エージェントを事業者単位で想定することでより現実世界に近い世界モデルが開発できると考えられる。

1-2. ゲーム理論の世界モデルへの適用

複数のエージェントが互いに戦略をとりあう世界を考えるにあたって、ゲーム理論の概念を用いて世界モデルを構築することを考える。

1-2-1. ゲーム理論に基づく市場モデル

複数のエージェントが存在するモデルでは、それぞれの意思決定が相互に関連し、あるエージェントが得る利益は自分自身の戦略だけでなく他エージェントの戦略にも依存する。任意のエージェントの影響が市場の規模に対して十分小さい市場を完全競争市場と呼ぶ。また市場参加者が自分ひとりである市場を独占市場と呼ぶ。どちらの場合においても、あるエージェントの利益は自分の戦略と市場情報のみによって決まるため、他エージェントとの戦略上のかけひきなどは存在しない。

これらのどちらにも当てはまらず、少数の参加者が競争する市場は寡占市場と呼ばれる。このような市場において、プレーヤーの戦略はどのように決定されるかという点を表現する最も基本的なモデルが、ゲーム理論の中でも戦略形ゲームと呼ばれているモデルである。

完全競争市場と独占市場¹⁴⁾

需要と供給の関係において消費者は消費者余剰を、生産者（供給者）は生産者余剰を最大化させようとする。完全競争市場では消費者余剰と生産者余剰の和である社会的厚生が最大となる市場均衡点に収束し、ナッシュ均衡状態になると考えられる。それに対し、独占市場状態では生産者が生産者余剰を最大化させるような価格戦略を取り、生産者余剰は減少する。

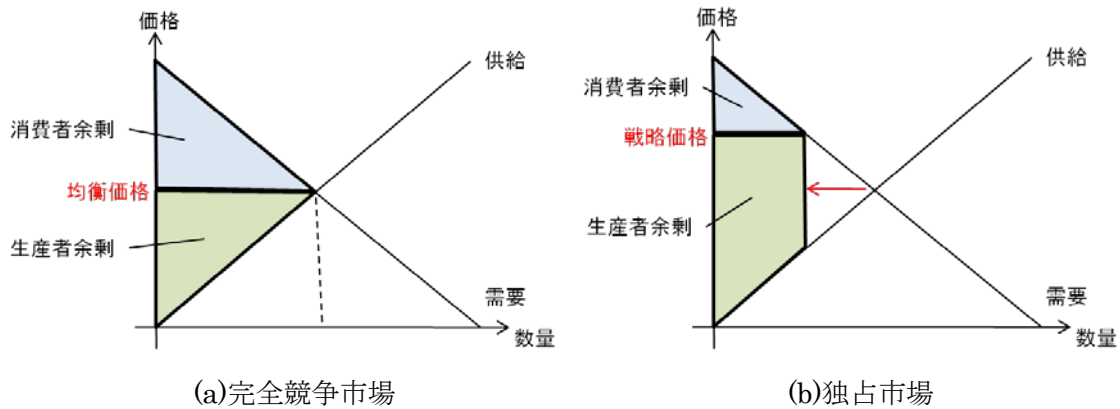


図 1-1. 需要と供給の関係

1-2-2. ナッシュ均衡

各エージェントが自分の利得を最適にする行為は個人合理性を満たすという。しかし、他と相互依存関係にある場合には、自己の効用関数は他のエージェントの行為にも依存することから、各エージェントは個人合理性を満たす行為を一存で決定することはできない。そこで、すべてのエージェントの個人合理性の条件を同時に満足する均衡状態を、ナッシュ均衡解という。すなわちナッシュ均衡解において、すべてのエージェントの利得は同時に最適化されている。

次にこのナッシュ均衡解を具体的に求める。マルチエージェント $G=\{A_i : i=1,2, \dots, n\}$ による戦略的状况において、各エージェント $A_i \in G$ がそれぞれ戦略 x_i をとるときの効用関数 U_i を、他エージェントの戦略の組 \mathbf{x}_{-i} にも依存する関数として次式で表す^[5]。

$$U_i(x_i, \mathbf{x}_{-i}) \quad \mathbf{x}_{-i} \equiv (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \quad (\text{式 1-1})$$

するとエージェント A_i の個人合理性を満たす戦略 ϕ_i は次のように表される。

$$\phi_i(\mathbf{x}_{-i}) = \max_{x_i} U_i(x_i, \mathbf{x}_{-i}) \quad (\text{式 1-2})$$

(式 1-2) の戦略 ϕ_i は、他エージェントの戦略の組 $\mathbf{x}_{-i} \in \mathbf{X}_i$ を与えたとき、エージェント A_i の利得を最適にする戦略を表している。これは他エージェントの戦略の関数として求まることから、エージェント A_i の最適な反応戦略という。

マルチエージェントモデルにおいて、すべてのエージェントが個人合理性の条件を満たしている状態がナッシュ均衡解である。これは他エージェントの戦略を所与として、すべての

エージェントが最適な戦略を決定することで実現される均衡状態のことである。ナッシュ均衡解を \mathbf{x}° とすると、次の条件式をすべて満たすことが必要十分条件となる。

$$\begin{cases} U_1(x_1^\circ, \mathbf{x}_{-1}^\circ) \geq U_1(x_1, \mathbf{x}_{-1}^\circ) & \forall x_1 \in X_1 \\ U_2(x_2^\circ, \mathbf{x}_{-2}^\circ) \geq U_2(x_2, \mathbf{x}_{-2}^\circ) & \forall x_2 \in X_2 \\ \vdots \\ U_n(x_n^\circ, \mathbf{x}_{-n}^\circ) \geq U_n(x_n, \mathbf{x}_{-n}^\circ) & \forall x_n \in X_n \end{cases} \quad (\text{式 1-3})$$

これを(式 1-2)に表された反応関数を用いて表現すると次のように、一組の連立方程式の解として表すことができる。

$$\begin{cases} x_1^\circ = \phi_1(\mathbf{x}_{-1}^\circ) \\ x_2^\circ = \phi_2(\mathbf{x}_{-2}^\circ) \\ \vdots \\ x_n^\circ = \phi_n(\mathbf{x}_{-n}^\circ) \end{cases} \quad (\text{式 1-4})$$

各エージェント A_i の効用関数 U_i が上に凸な関数であると仮定すれば、(式 1-4)に表される連立方程式は、次のように表される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad , \quad i = 1, \dots, n$$

1-3. 研究目的

以上のことを踏まえ、本研究では次のことを目的とした。

- ・ 事業者単位のエージェントを想定し、事業者間の競合を表現できるモデルの開発
モデル内に想定するエージェントを事業者単位にすることで、各資源の価格戦略などがより現実に近い状態で評価できる。また事業者間の競合によって各国、各地域のエネルギーバランスがどのように変化するかも評価することが可能になる。
- ・ 戦略更新時の感度解析にパラメータ n を組み込むことで、 n 人の同業者による競合を表現できるモデルへの書き換え
第 5 章で論ずる同業者の人数を表すパラメータ n を、戦略更新時の感度解析に組み込み、モデル内の実際のエージェントの人数を増やすことなく同業者の競合を表現する。同業者の競合を考えることで、市場の独占、寡占、完全競争状態それぞれにおける均衡価格に対する知見を得られると考えられる。
- ・ 書き換えたモデルの妥当性の評価
書き換えたモデルが、本当に n 人の同業者に競合を表現できているかを確認し、開発した本モデルの妥当性を評価する
- ・ 市場における価格決定要因の探索
開発したモデルにおけるシミュレーションによって、複数の同業者が存在し、互いに競合する世界における市場均衡価格決定の要因を探る

第2章 モデルの概要

本研究では世界全体最適化型 DNE21 モデルを元に、モデルの書き換えを行った。以下に各モデルの概要をしるす。

2-1. 世界全体最適化型DNE21 モデル^[1]

DNE21 モデルはエネルギーの視点から見た、世界レベルで推進されるべき CO₂ 削減シナリオの構築を目的として開発された非線形最適化型モデルである。世界を 10 の地域(Region)に分け、2000～2150 年における各地域のエネルギーコストの総和を最小化することで世界全体での最適なエネルギーシステムバランスを示す。世界全体のエネルギーコストの和が目的関数となっているため、世界全体が協力した場合の評価結果を示すこととなる。

2-1-1. Region の定義

DNE21 モデルでは、世界を地理的、経済的結びつきの観点から図 2-1 のように 10 の地域に分けている。CO₂排出量やSO_x排出量などに関する制約は、このRegion単位でかけられることとなる。また石油資源等の貿易取引はこのRegion単位で行われるものと想定している。各Region間での貿易における輸送距離は、代表都市間の距離を以て表 2-2,2-3 のように定義される。また同一Region内での物資の輸送（分配）は想定していない（例えばアラスカ～ニューヨーク間の輸送は想定していない）^[6]。



図 2-1 : DNE21 における 10 地域

表 2-1 : DNE21 における 10 地域

Region1	北アメリカ
Region2	西欧
Region3	日本
Region4	オセアニア
Region5	計画経済圏アジア
Region6	その他アジア
Region7	中東・北アフリカ
Region8	サハラ以南のアフリカ
Region9	中・南アメリカ
Region10	ロシア・東欧

表 2-2 : 各地域間の海上距離 (1000km)

	Region1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Region1	0	6	7	12	8	9	9	9	8	6
2	6	0	1	17	0	0	0	5	9	0
3	7	1	0	8	1	6	10	13	19	1
4	12	17	8	0	8	9	15	15	14	7
5	8	0	1	8	0	0	9	12	18	0
6	9	0	6	9	0	0	4	8	13	0
7	9	0	10	15	9	4	0	0	10	0
8	9	5	13	15	12	8	0	0	6	0
9	8	9	19	14	18	13	10	6	0	10
10	6	0	1	7	0	0	0	0	10	0

表 2-3：各地域間の陸上距離（1000km）

	Region1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Region1	0	1	0	3	3	3	1	1	1	2
2	1	0	9	0	8	7	3	0	0	2
3	0	9	0	0	1	0	0	0	0	7
4	3	0	0	0	1	2	0	0	0	8
5	3	8	1	1	0	4	1	1	1	6
6	3	7	0	2	4	0	1	1	1	6
7	1	3	0	0	1	1	0	4	0	3
8	1	0	0	0	1	1	4	0	0	6
9	1	0	0	0	1	1	0	0	0	2
10	2	2	7	8	6	6	3	6	2	0

2-1-2. DNE21 モデルの数式

DNE21 モデルは、上述の 10 の地域それぞれにおけるエネルギーコストの和を目的関数としており、目的関数を最小化する最小化問題として解かれる。また制約条件式は各Region内における制約条件部分 \mathbf{A}_n と世界全体における制約条件部分 \mathbf{T}_n （貿易、CO₂濃度、気温上昇項など）に分けられる。Region内制約条件には資源供給バランス(需要と供給)や設備の上限制約などが含まれる。

$$\text{目的関数} \quad J = \sum_n f_n(\mathbf{x}_n) \rightarrow \min \quad (\text{式 2-1})$$

$$\text{制約条件式} \quad \mathbf{Ax} \geq \mathbf{b} \quad (\text{式 2-2})$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{10} \\ \mathbf{T}_1 & \cdots & \mathbf{T}_n & \cdots & \mathbf{T}_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_n \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{10} \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{b}_n \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{10} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix}$$

図 2-2：制約条件式の行列表現

f_n : 第 n 地域のエネルギーコスト関数
 A : 全制約条件左辺行列
 b : 全制約条件右辺列ベクトル
 x : 全変数列ベクトル
 A_n : 第 n 地域内における制約条件行列成分
 b_n : 第 n 地域内における制約条件列ベクトル成分
 x_n : 第 n 地域内における変数列ベクトル成分
 T_n : 地域間の制約条件における第 n 地域の行列成分
 e : 地域間の制約条件式右辺列ベクトル成分

2-1-3. DNE21 モデル内の貿易

DNE21 モデルでは、以下に示す品目を **Region** 間で取引されることを想定している。

- ①水素
- ②天然ガス
- ③回収されたCO₂
- ④原油
- ⑤石炭
- ⑥メタノール
- ⑦CO₂排出権（市場1）
- ⑧CO₂排出権（市場2）
- ⑨統合油（合成油）

Region 間での取引には、大きく 2 通りの取引方法が存在し、品目ごとにその取引方法が定められている。以下にその詳細を示す。

Region－Region間で直接取引されるもの

まず 1 つ目の方法が、**Region－Region**間で直接取引される方法である。上記の品目のうち、①水素、②天然ガス、③回収されたCO₂ がこの方法で取引される。この方法では図 2-3 に示すようにお互いの**Region**同士で直接品物を取引することとなる。この際の取引に関する制約条件式は式 (2-3) で表され、地域ごとに資源バランスが取られている。各制約条件式から導かれるシャドープライスが、その地域での取引価格となっており、各品目に対して**Region**ごとに輸入（輸出）価格が定まることとなる。

$$\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^N Xr \exp_{i,m,n,t} = Xrimp_{i,n,t} \quad (\text{式 2-3})$$

$Xr \exp_{i,m,n,t}$: t 時点における第 m 地域から第 n 地域への品目 i の輸出量

$Xrimp_{i,n,t}$: t 時点における第 n 地域への品目 i の輸入量

N : 全地域数

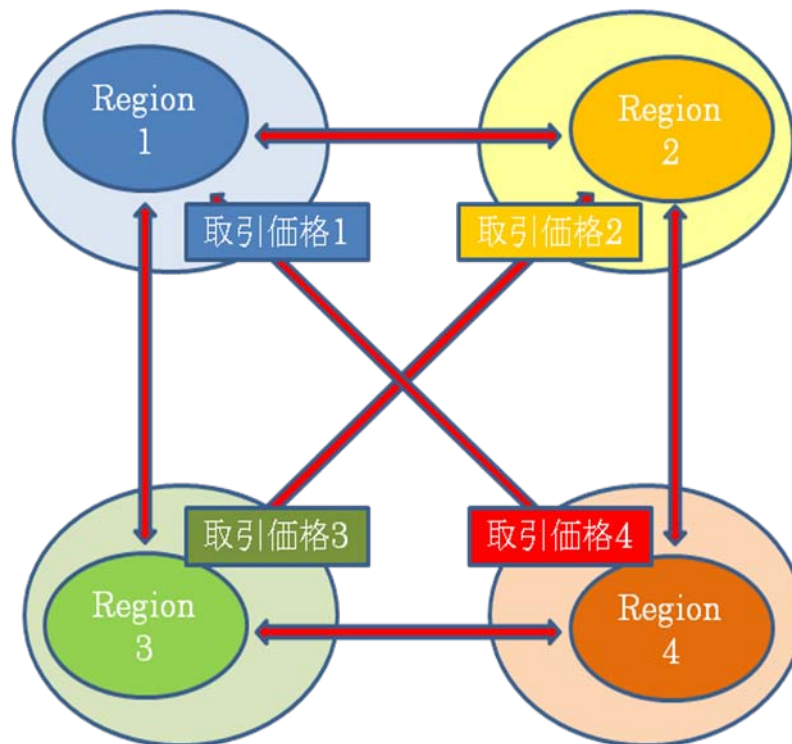


図 2-3 : Region-Region 直接取引の様子

国際市場取引によって取引されるもの

国際市場取引によって取引されるのは④原油、⑤石炭、⑥メタノール、⑦CO₂排出権（市場 1）、⑧CO₂排出権（市場 2）、⑨統合油（合成油）である。これらは図 2-4 に示すように一度国際市場に集められ、そこで一括して取引が行われる。これらの品目の取引に関する制約条件式は(式 2-4)で表され、各資源に対して世界全体で一つの需給バランスが取られていることになる。また、この式のシャドープライスが各資源の取引価格となっており、各資源の取引価格は世界共通の価格となる。なお⑦CO₂排出権(市場 1)と⑧CO₂排出権(市場 2)は、⑦の市場 1 は京都議定書を批准した国家(地域)のみが取引を行え、⑧の市場 2 は京都議定書を批准していない国家(地域)も排出権取引ができる市場と想定している。

$$\sum_{n=1}^N Xwexp_{i,n,t} = \sum_{n=1}^N Xwimp_{i,n,t} \quad (\text{式 2-4})$$

$Xwexp_{i,n,t}$: t 時点における第 n 地域からの品目 i の輸出量

$Xwimp_{i,n,t}$: t 時点における第 n 地域への品目 i の輸入量

N : 全地域数

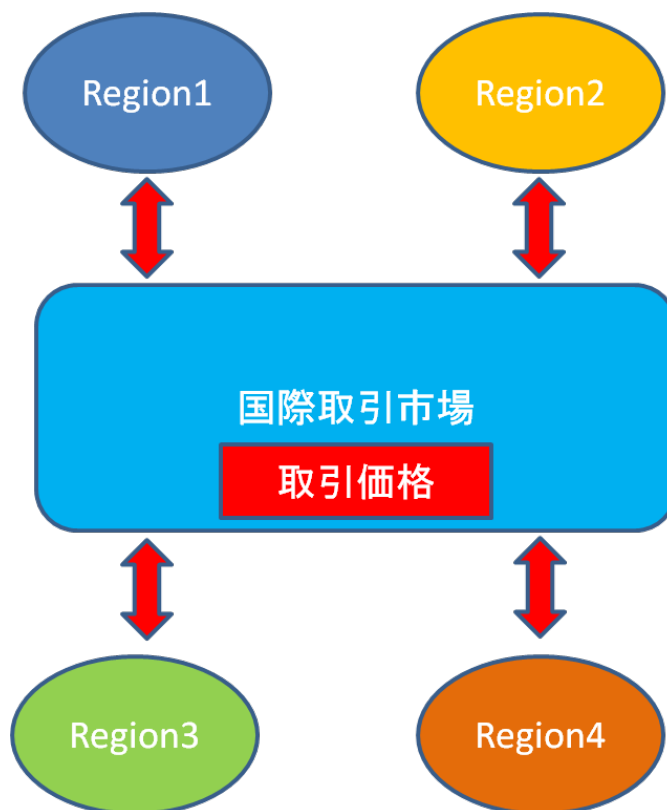


図 2-4 : 国際市場取引での取引の様子

2-2. DNE21 モデルのマルチエージェント化

次に DNE21 モデルをマルチエージェント化したモデルについて記す。

2-2-1. エージェントの定義

モデル内の各地域（Region）に、意思決定者(エージェント)が存在することを想定する。各地域に一人ずつエージェントが存在し、各エージェントはそれぞれ自分の意志で意思決定を行う。この際、あるエージェント 1 は他のエージェント 2 のことを気にすることなく意思決定を行うため、エージェント同士の競合関係が顕在化することが考えられる。各エージェントは意思決定を行う際、後述する報酬関数を基に意思決定するものとなる。

2-2-2. マルチエージェント化モデルの数式

マルチエージェント化モデルにおける目的関数と制約条件式はそれぞれ（式 2-5）、（式 2-6）で表される。制約条件式は DNE21 モデルと同じままで、目的関数に戦略ベクトル項が含まれる。この戦略ベクトル項（後述）を含むことで、マルチエージェント下での競合状態を表現することとなる。

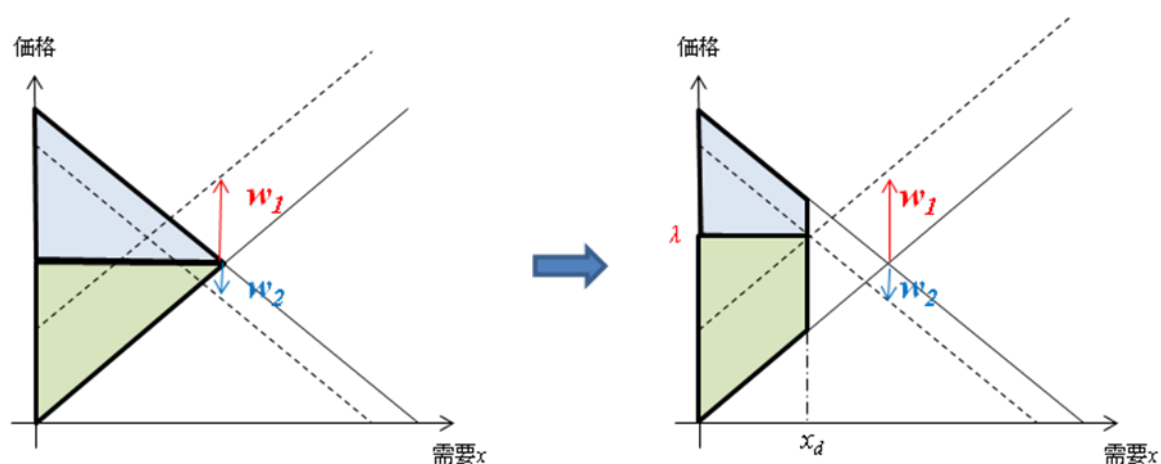
$$\text{目的関数} \quad J = \sum_n \{f_n(x_n) + w_n x_n\} \rightarrow \min \quad (\text{式 2-5})$$

$$\text{制約条件式} \quad Ax \geq b \quad (\text{式 2-6})$$

w_n : 第 n 地域(エージェント)の持つ戦略ベクトル項

2-2-3. 戦略ベクトル w

マルチエージェント化モデルにおいて、エージェント間の競合は戦略ベクトルの更新によって表現される。戦略ベクトルの成分は、変数ベクトル x の成分と一対一対応しており、各エージェントは戦略ベクトルの成分値を更新することで目的関数のコスト係数を変化させる。そうすることで最小化すべき目的関数が変化し、最適均衡解ベクトル x^* も変化する。各エージェントは自身の報酬関数（後述）を改善するような最適均衡解ベクトル x^* を得られるようになる。この戦略ベクトルの更新を繰り返すことで、各エージェントの報酬関数にとって最適な解ベクトル x^* を探索することとなる。



$g(x)$: 生産者のコスト関数
 $u(x)$: 消費者のコスト関数
 w_1 : 生産者の戦略成分
 w_2 : 消費者の戦略成分
 x_d : 均衡変数解
 λ : 均衡価格(シャドープライス)

図 2-5 : 戦略ベクトルの意味と目的関数の関係の概念図

生産者、消費者がそれぞれ戦略をとることで、需要と供給の均衡点は変化し x_d になったとする。このとき緑色の面積が生産者の報酬関数を、青色の面積が消費者の報酬関数を意味する。この緑色の面積と青色の面積はそれぞれ

生産者余剰（緑色） $g(x_d) + w_1 x_d$

消費者余剰（青色） $-u(x_d) + w_2 x_d$

と表せる。この二つを足し合わせたもの

$$g(x_d)-u(x_d)+(w_1+w_2)x_d \quad \dots(*)$$

が全体の社会厚生であり（式 2-5）と同じ形になっている。今(*)は報酬方向を正としており、（式 2-5）ではコスト方向を正としているため、(*)を最大化することと（式 2-5）を最小化することは同じ意味を差す。

つまり本マルチエージェントモデルにおける目的関数は、各エージェントが戦略をとった状態での社会厚生が最大になる点を探索することで最適均衡解を導いていることがわかる。

2-2-4. 報酬関数

各エージェントが意思決定をし、他エージェントに対して戦略行動をとる際、自身の報酬（コスト）が改善（減少）されるような戦略行動を選択するものとする。以下に各エージェントの報酬関数を記す。

$$\text{報酬関数} \quad R_n = -f_n(x_n) + \lambda_n(T_n x_n - e_n) \quad (\text{式 2-7})$$

f_n ：第 n 地域（エージェント）のエネルギーコスト関数

x_n ：第 n 地域（エージェント）の変数列ベクトル

T_n ：地域間の制約条件式における第 n 地域（エージェント）の行列成分

e_n ：地域間の制約条件式における第 n 地域（エージェント）の右辺ベクトル成分

λ_n ：地域間の制約条件式のシャドープライスベクトル

報酬関数は、各エージェント（地域）のエネルギーコスト関数と、地域間取引（他エージェントとの取引）コストの和となっている。地域間の資源取引額を報酬関数に組み込むことで、より戦略が反映されやすくなっている。尚、戦略ベクトル項が含まれていないことに注意が必要である。

2-3. DNE21 モデルのマルチエージェント化の細分化

本研究で用いたモデルでは、DNE21 モデルのマルチエージェント化の手法を応用し、1-1-2 節で論じた事業者単位という概念の元さらにエージェントを細分化している。

2-3-1. 細分化されたエージェントの定義

モデル内に表 2-5 に示す様なエージェントを定義した。第 n 地域内の変数ベクトル \mathbf{x}_n を変数の持つ意味ごとに分類し、第 i エージェントごとに変数ベクトル \mathbf{x}_i を作る (図 2-6 参照)。各地域に 11 種類のエージェント (事業者) を定義し、それぞれが意思決定を行うものとなる。

表 2-5 : エージェントの種類と各エージェントが考慮する変数

エージェントの種類	エージェントが考慮する変数(コスト)
石油業者	原油の輸出入、生産におけるコスト 製油プラントの建設コスト 石油の域内販売での利益
石炭業者	石炭の輸出入、生産におけるコスト 石炭の気化、液化プラントの建設コスト、 石炭、気化石炭、液化石炭の域内販売での利益
天然ガス業者	天然ガスの輸出入、生産、 gas splitting プラント建設のコスト 天然ガス、水素の域内販売での利益
水素業者	水素の輸出入コスト 水素の域内販売での利益
メタノール業者	メタノールの輸出入、生産におけるコスト メタノール精製プラント、ガソリン精製プラントの建設コスト メタノールの域内販売での利益
バイオマス業者	バイオマスの生産におけるコスト バイオマス気化、液化プラントの建設コスト バイオマス (気化、液化含む) の域内販売での利益
電気事業者	各種燃料での発電コスト 発電プラントの建設コスト 電力の域内販売での利益
消費者	各種燃料、電力の購入コスト
CO ₂ 貯留業者	CO ₂ の輸出入、CO ₂ 地下貯留コスト
IES(統合エネルギーシステム)業者	IES における水素、メタンの生産コスト
再森林化業者	再森林化におけるコスト

$$\begin{bmatrix} x_1^n \\ x_2^n \\ x_3^n \\ x_4^n \\ x_5^n \\ x_6^n \\ x_7^n \\ \vdots \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1^n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ x_5^n \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ x_2^n \\ x_3^n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ x_7^n \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ x_4^n \\ 0 \\ x_6^n \\ 0 \\ \vdots \end{bmatrix} + \dots$$

x_m^n : 第 n 地域の変数ベクトル \mathbf{x}_n の第 m 変数

図 2-6 : 第 n 地域の変数ベクトル \mathbf{x}_n の分離の様子

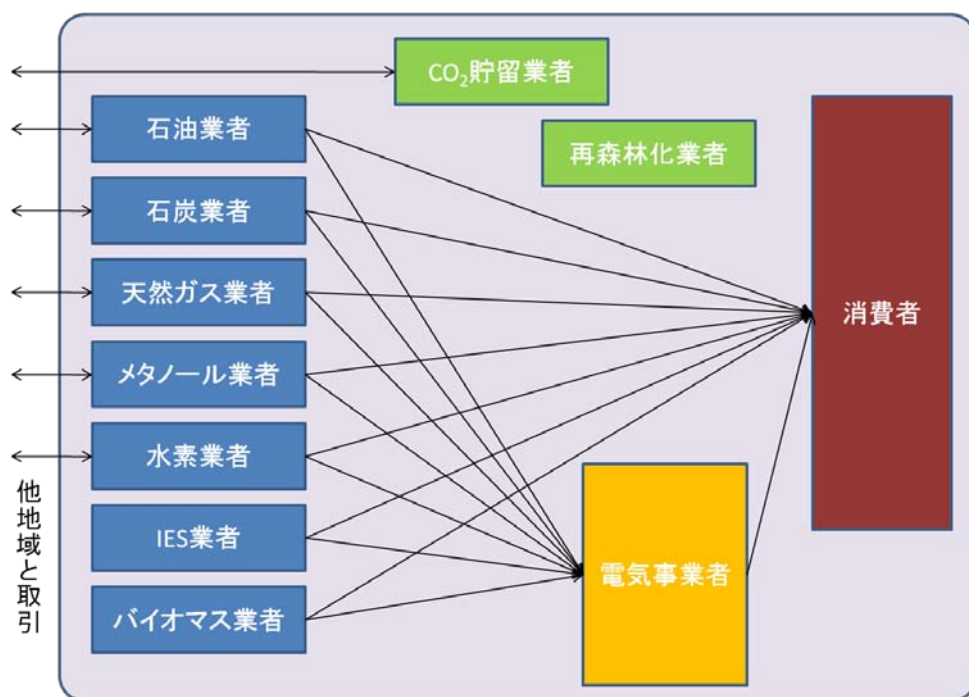


図 2-7 : 同一地域内のエージェント間のエネルギーフロー

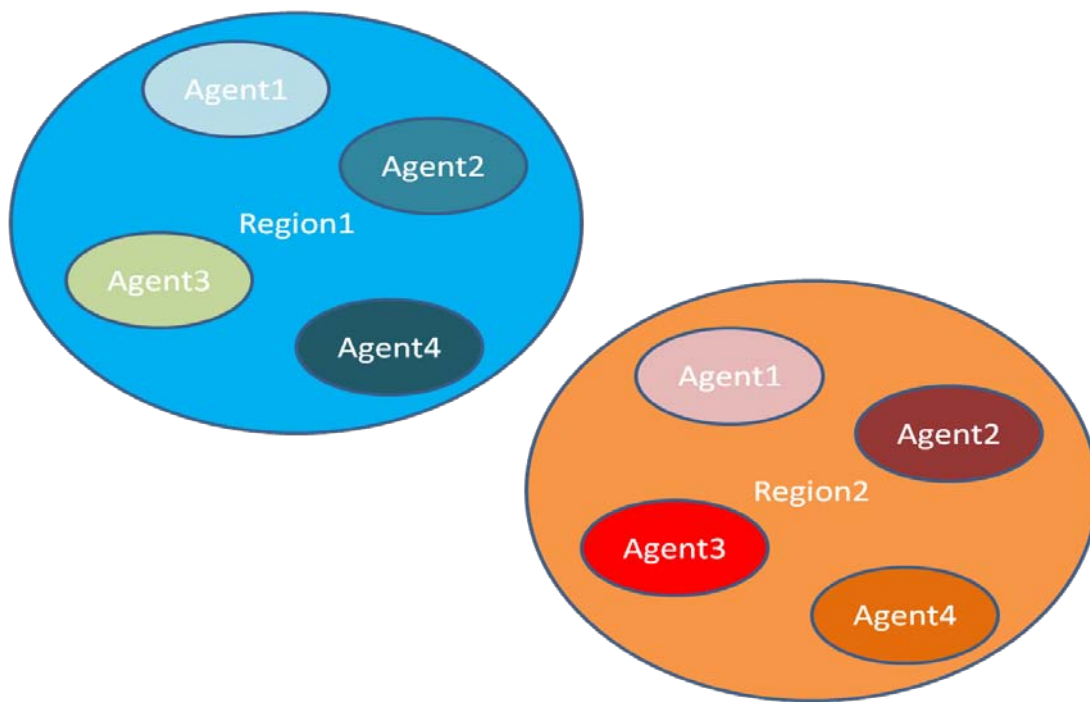


図 2-8 : エージェントと Region (地域) の関係

2-3-2. エージェント間の取引

細分化された（事業者単位の）エージェントは、他エージェントと取引をし、その取引による利得を得る。以下にその詳細を示す。

他地域のエージェントとの取引

他地域のエージェントと取引をすることができるのは、貿易に関する変数を持つエージェントであり、石油業者、石炭業者、天然ガス業者、水素業者、メタノール業者、CO₂回収貯留業者である。各業者は自分が扱う資源の貿易の決定権を持っている。自地域での資源の需要を満たすように過不足分を各エージェントが貿易によって調達してくる。貿易時の各資源の需給は（式 2-2）（式 2-3）の制約式を満たす。そして貿易取引時の各資源の価格は（式 2-2）式 2-3）のシャドープライスで決まる。調達してきた資源を地域内で販売する際の価格は後述の地域内取引制約式のシャドープライスで決まり、貿易時のシャドープライスとの差額によって利得を得ることも可能である。例えば、日本の石油業者は石油（原油）を海外から安く仕入れて、それを国内の消費者、電気事業者などに販売することで自身の利得を得ることができる。以下に例として地域 n の石炭業者の他地域との取引による利得を示す。

$$\lambda'_t \{ Xwimp'_{n,t} - Xwimp'_{n,t} \} \quad (2-1)$$

λ'_t : t 時点における石炭の国際取引価格（シャドープライス）[\$/TOE]

$Xwexp'_{n,t}$: t 時点における第 n 地域からの石炭輸出量変数

$Xwimp'_{n,t}$: t 時点における第 n 地域への石炭輸入量変数

国際取引（貿易）による利得は、自身の輸出量と輸入量との差に取引価格（シャドープライス）を乗じたものとなる。輸出過多なエージェントは利得を得、輸入超過のエージェントはコストをえることとなる。全地域の石炭を扱うエージェントに対して（2-1）を足し合わせることで総和は0となる。これは国際取引によって、各エージェントの利得が変化するが、世界全体でのコストの総和は変化しないことを意味する。

同一地域のエージェントとの取引

エージェントの細分化により同一地域内に複数のエージェントが存在し、地域内の資源の需給関係が顕在化する。同一地域内でのある資源の取引がどのエージェントにとって利益を生み、どのエージェントにとってコストとなるのかは、その資源の地域内取引を表す制約条件式によって決まる。以下に例として、同一地域内における石炭の取引の様子を示す。

まず石炭の地域内取引を表す制約条件式は（式 2-8）である。

$$Xwimp_{t,n} + \sum_{g=1}^G Xexha_{g,t,n} \geq Xwexp_{t,n} + \frac{1}{1 - tdloss} \times \left\{ \sum_{i=0}^8 Xiucoal_{i,t,n} + demand_{t,n} \times shfdsk_n \right\} \quad (式 2-8)$$

$Xwimp_{t,n}$: t 時点における第 n 地域の石炭輸入量変数[MTOE/year]

$Xexha_{g,t,n}$: t 時点における第 n 地域のグレード g の石炭生産量変数[MTOE/year]

$Xwexp_{t,n}$: t 時点における第 n 地域の石炭輸出量変数[MTOE/year]

$tdloss$: 地域内輸送によるロス率定数[%]

$Xiucoal_{i,t,n}$: t 時点における第 n 地域内の石炭消費量変数($i=0$:発電需要(ピーク時)、
1:発電需要(中間時)、2:発電需要(オフピーク時)、3:IGCC発電需要(ピーク時)、4:IGCC発電需要(中間時)、5:IGCC発電需要(オフピーク時)、
6:石炭気化利用、7:石炭液化利用、8:固形燃料としての利用)
[MTOE/year]

$demand_{t,n}$: t 時点における第 n 地域の予想石炭需要量定数[MTOE/year]

$shfdsk_{t,n}$: t 時点における第 n 地域の石炭の原料としての使用割合定数[%]

左辺項が地域内供給量の総和を表しており、右辺項が地域内需要の総和を表している。この式から地域内の石炭のシャドープライス λ が算出される。(式 2-8) 内に自分が持つ変数 x を含むエージェントは、この取引によって利得(コスト)を得ることとなる。(式 2-8) には石炭業者、電気事業者、消費者のエージェントの持つ変数が含まれており、各エージェントの利得は以下のようになる。

①石炭業者の利得

$$\lambda_{t,n} \left\{ Xwimp_{t,n} + \sum_{g=1}^G Xexha_{g,t,n} - Xwexp_{t,n} - \frac{1}{1 - tdloss} \times (Xiucoal_{7,t,n} + Xiucoal_{8,t,n}) \right\} \quad (式 2-9)$$

$\lambda_{t,n}$: t 時点における第 n 地域の石炭価格(シャドープライス)[\$/TOE]

石炭業者の利得は、石炭の輸入量、生産量から輸出量と液化利用量、気化利用量を引いたものにシャドープライスを乗じたものとなる。利得で考えるために、左辺項にあった消費量の符号は逆転したものになっている。つまり、供給量を表す左辺項から右辺項の自身による消費を差し引いた量の石炭を販売し、その利得を得ることとなる。

②電気事業者の利得（コスト）

$$- \lambda_{t,n} \left\{ \frac{1}{1 - tdloss} \times \sum_{i=0}^5 Xiucoal_{i,t,n} \right\} \quad (式 2-10)$$

電気事業者の利得は石炭の各発電による消費量にシャドープライスを乗じたものとなる。電気事業者は石炭の生産に関する変数は持っていない、消費に関する変数のみを持っている（右辺項）。そのため石炭取引による利得は、負符号が付きコストとなる。

③消費者の利得（コスト）

$$- \lambda_{t,n} \{ Xiucoal_{8,t,n} + demand_{t,n} \times shfdsk_{t,n} \} \quad (2-2)$$

消費者も電気事業者同様、消費に関する変数のみを持つため、石炭の取引においてはコストを得ることとなる。また右辺最終項であった $demand_{t,n} \times shfdsk_{t,n}$ は消費者の消費に含まれるとし、消費者の利得（コスト）計算に計上してある。

以上のようにして制約条件式から各エージェントへの利得を計算する。(式 2-9)式 2-10) (2-2) を全て足し合わせると (式 2-8) に $\lambda_{t,n}$ を乗じたものとなり、和は 0 となる。つまり地域内での取引によって、エージェント間の利得（コスト）は変化するが、その地域全体で考えたとき、地域内取引による利得は 0 である。

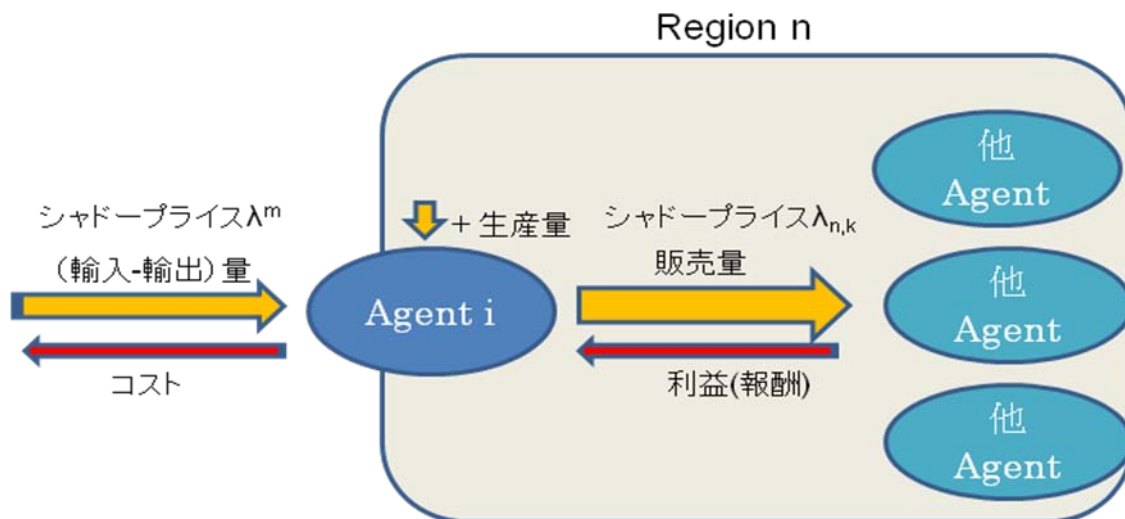


図 2-9：第 n 地域内第 i エージェントの地域内外取引の様子

2-3-3. エージェントの報酬関数

上記の地域外取引、地域内取引を考慮し、各エージェントの報酬関数を定義する。

$$\text{報酬関数} \quad R_{n,i} = -f_{n,i}(\mathbf{x}_{n,i}) + \lambda_n (A_{n,i} \mathbf{x}_{n,i} - \mathbf{b}_{n,i}) + \lambda'_n (T_{n,i} \mathbf{x}_{n,i} - \mathbf{e}_{n,i}) \quad (\text{式 2-11})$$

$R_{n,i}$: 第 n 地域の第 i エージェントの報酬関数

$f_{n,i}$: 第 n 地域の第 i エージェントのエネルギーコスト関数

$\mathbf{x}_{n,i}$: 第 n 地域の第 i エージェントの変数列ベクトル

$A_{n,i}$: 地域内の制約条件式における第 n 地域の第 i エージェントの行列成分

$\mathbf{b}_{n,i}$: 地域内の制約条件式における第 n 地域の第 i エージェントの右辺ベクトル成分

λ_n : 地域内の制約条件式のシャドープライスベクトル

$T_{n,i}$: 地域間の制約条件式における第 n 地域の第 i エージェントの行列成分

$\mathbf{e}_{n,i}$: 地域間の制約条件式における第 n 地域の第 i エージェントの右辺ベクトル成分

λ'_n : 地域間の制約条件式のシャドープライスベクトル

各エージェントの報酬関数は（式 2-7）に地域内取引による項（第二項）を加えたものとなる。基本的に各エージェントの総コストに負符号をつけたものが報酬関数であるが、地域内での取引が加わったことで、報酬関数が負となる（トータルで利益を出す）エージェントが存在する可能性が強くなる。これは現実世界において、各企業（事業体）が利益をあげて表現しているものと考えることができる。

また、全エージェントの報酬関数を足し合わせると、第 2、3 項が打ち消しあい

$$\sum_n \sum_i R_{n,i}(\mathbf{x}_{n,i}) = - \sum_n \sum_i f_{n,i}(\mathbf{x}_{n,i}) \quad (\text{式 2-12})$$

となり報酬関数の総和は世界全体でのエネルギー総コストに負符号を乗じたものと等しくなる。

2-3-4. 戦略ベクトル

エージェント細分化モデルにおける戦略ベクトルは基本的に 2-2-3 節の戦略ベクトルと同様である。各エージェントは自分に属する変数のコスト関数係数成分にかかる戦略ベクトル成分を更新することで、地域内外の他エージェントに対して戦略行動をとる。

2-3-5. 計算フロー

以下にプログラム全体の計算フローを示す。各エージェントは戦略ベクトルの更新を繰り返すことで、自身の報酬関数を改善しようとする。以下の試行を数千回～数万回繰り返すことで、各エージェントがこれ以上戦略行動が取れない状態（ナッシュ均衡状態）になる状態を目指す。ナッシュ均衡（もしくはそれに近い状態）での、資源の均衡価格を見ることで、競合状況下での各種資源の適正価格に対する知見が得られるものとする。

①世界最適化問題を解き、最適解ベクトル \mathbf{x}^* を得る

$$J = \sum_n \sum_i f_{n,i}(\mathbf{x}_{n,i}) \rightarrow \min$$

$$A\mathbf{x} \geq \mathbf{b}$$

②最適均衡解ベクトル \mathbf{x}^* を用いて各エージェントの報酬関数を計算する

$$R_{n,i} = -f_{n,i}(\mathbf{x}_{n,i}^*) + \lambda_n (A_{n,i} \mathbf{x}_{n,i}^* - \mathbf{b}_{n,i}) + \lambda'_n (T_{n,i} \mathbf{x}_{n,i}^* - \mathbf{e}_{n,i})$$

③戦略行動を取る（戦略ベクトルを更新させる）エージェントを決める

④選ばれたエージェントが自身に所属する変数の戦略ベクトル成分を更新する

⑤④の戦略が反映された状態での世界最適化問題を解き、新たな最適均衡解ベクトル \mathbf{x}^* を得る

$$J = \sum_n \sum_i \{f_{n,i}(\mathbf{x}_{n,i}) + w_{n,i} \mathbf{x}_{n,i}\} \rightarrow \min$$

$$A\mathbf{x} \geq \mathbf{b}$$

※以下②に戻り②～⑤を繰り返す

第3章 感度解析による戦略決定

本章では、戦略更新の際の戦略決定の手法として感度解析を用いた方法について述べる。前章で示したように、各エージェントは戦略ベクトルを更新し、最適均衡解を変化させることで自身の報酬関数を改善させようとする。どの戦略ベクトル成分を更新させるかでそのエージェントの戦略行動が決まるわけだが、もちろん各エージェントは自身の報酬関数を効率よく改善できる戦略ベクトル成分を更新しようとするはずである。そこで各エージェントに、どの成分の値をどの位変化（更新）させると自分自身の報酬関数をどの程度更新できるかという情報を予め与えることを考える。

3-1. 従来の戦略ベクトルの更新方法

従来のマルチエージェント化されたDNE21モデルでは、各エージェントの戦略ベクトル更新の際に予め情報を与えるのではなく、ランダムに戦略ベクトルに更新成分を加えていた¹³⁾。以下にその詳細を記す

3-1-1. ランダム更新法

従来のモデルでは地域外取引（貿易）にかかわる変数に対応する戦略ベクトル成分の中からランダムに更新する成分を選び、その成分値に正規分布によって得られた摂動値 δw を加えることで、戦略ベクトルを更新していた。以降この方法をランダム更新法と呼ぶ。

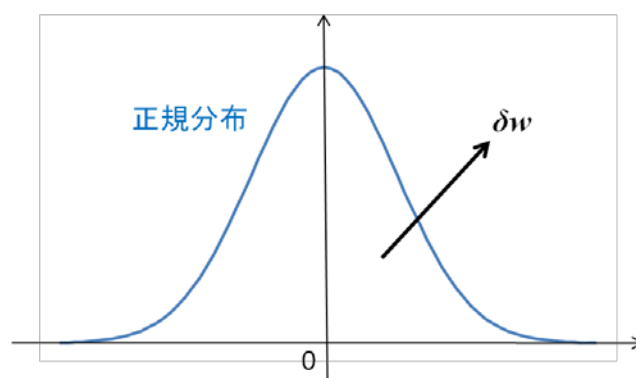
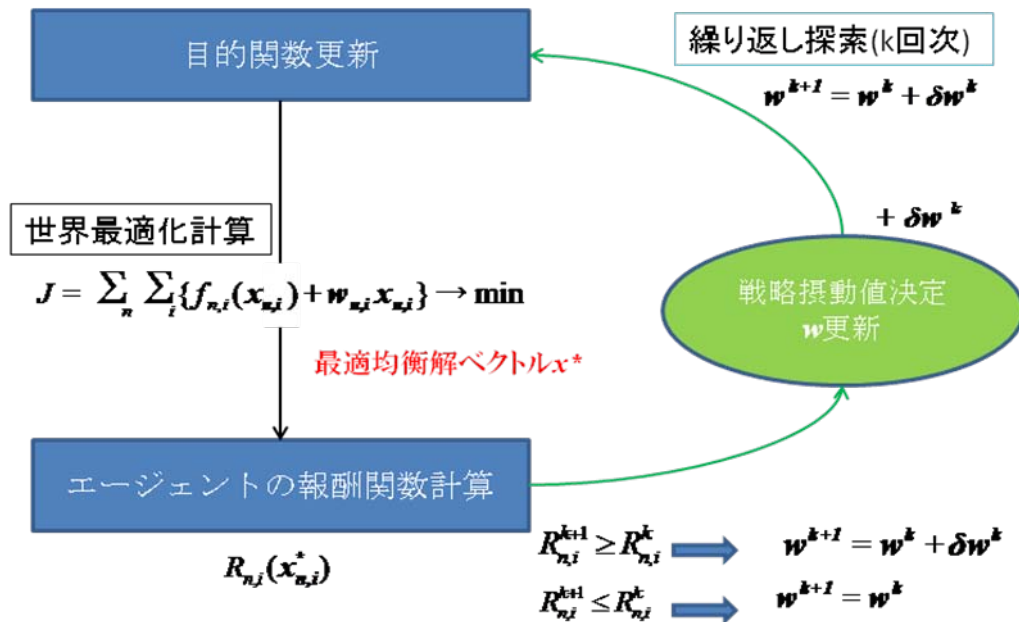


図 3-1. 戦略ベクトルの摂動値の抽出方法
※摂動値は正規分布を用いて確率的に決定する

この方法では、戦略ベクトルの更新が自身の報酬関数を改善させるか分からず、戦略更新により、報酬関数を減少（悪化）させてしまう場合が出てきてしまう。そこでランダム更新法では、戦略ベクトルを更新した後に報酬関数が改善されたかどうか判定し、報酬関数が改善された場合のみ、その戦略ベクトルの更新を採用する方法を取っている。もし戦略ベクトルを更新した後に、戦略をとったエージェントの報酬関数が減少（悪化）した場合はその戦略ベクトルの更新は取り消され、戦略を取る前の状態に戻す。ランダムに戦略を更新し、うまく報酬関数が改善されたときのみ戦略を更新していくことで各エージェントにとって有益な戦略行動を表現する。



w_k : 計算 k 回時点での戦略ベクトル

δw_k : 計算 k 回時点での戦略ベクトル更新成分

$R_{n,i}^k$: 計算 k 回時点での第 n 地域の第 i エージェントの報酬関数

図 3-2 : ランダム更新法における戦略ベクトル更新の様子

3-2. 感度解析による戦略ベクトルの更新

前節のランダム更新法では、戦略をとったエージェントの報酬関数が改善されるかどうかは確率的であり、報酬関数が改善された場合のみ戦略ベクトルを更新するため非効率的であるといえる。また、戦略を与える成分をランダムに決定するため、各エージェントの意思を反映しているとは言えない。現実世界において各エージェント（事業者）は予め、戦略とそれによる効果（報酬関数の改善の度合い）を見積もってから戦略行動を起こすものと考えられる。そこで本研究では、各エージェントが感度解析によって報酬関数を効率よく改善できる戦略ベクトルの更新方法を知ることができるモデルの開発を行った。

3-2-1. 感度解析

戦略ベクトルの更新により、最適化問題の目的関数が変化し、最適均衡解 \mathbf{x}^* が変化し $\mathbf{x}^* + \delta \mathbf{x}$ になったとする。このとき戦略ベクトルの更新値 $\delta \mathbf{w}$ と最適均衡解の変化分 $\delta \mathbf{x}$ との関係を解析的に導くことで、エージェントが自身の報酬関数を改善できる戦略ベクトル更新値 $\delta \mathbf{w}$ に対する情報を得、目的をもった戦略選択が可能になる。

3-2-2. Kuhn-Tucker 条件

凸計画問題

非線形の凸計画問題に対して Kuhn-Tucker 条件は最適解の必要十分条件であることが知られている^[7]。凸計画問題とは、目的関数 $f(\mathbf{x})$ に対して任意の 2 点 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ をとった時に

$$f\{\theta \mathbf{x}_1 + (1 - \theta) \mathbf{x}_2\} \leq \theta f(\mathbf{x}_1) + (1 - \theta) f(\mathbf{x}_2) \quad (\text{式 3-1})$$

$$0 \leq \theta \leq 1 \quad (\text{式 3-2})$$

θ : 任意定数

が成り立つ問題である。本モデルでは、目的関数の非線形項を逐次二次近似法によって二次近似して解いているため、目的関数はこの凸性を満たす。

Kuhn-Tucker条件式

$$\text{目的関数} \quad f(\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad (\text{式 3-3})$$

$$\text{制約条件式} \quad g(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (\text{式 3-4})$$

に対するラグランジュ関数は (式 3-5) で定義される

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\lambda}^T g(\mathbf{x}) \quad (\text{式 3-5})$$

$\boldsymbol{\lambda}$: ラグランジュ乗数ベクトル (シャドープライスベクトル)

これを偏微分することにより得られる次の Kuhn-Tucker 条件が最適性の必要十分条件となる。

$$\square_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \square_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) - \square_{\mathbf{x}} g(\mathbf{x}) \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (\text{停留点条件}) \quad (\text{式 3-6})$$

$$\square_{\boldsymbol{\lambda}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = g(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (\text{実行可能性}) \quad (\text{式 3-7})$$

$$\boldsymbol{\lambda} \geq 0 \quad (\text{最適性 [非負条件]}) \quad (\text{式 3-8})$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T g(\mathbf{x}) = 0 \quad (\text{相補性}) \quad (\text{式 3-9})$$

停留点条件は最適均衡解 \mathbf{x} が計画問題の局所最適解であることを保証し、実行可能性はその最適均衡解 \mathbf{x} が元の問題の制約条件式を満たしていることを意味する。

本モデルへの適用

Kuhn-Tucker 条件を本モデルにあてはめることを考える。前述の通り本モデルでは逐次二次近似法を用いて最適問題を解いている。目的関数は二次近似項と線形項に分けられ（式 3-10）のように書ける。

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \mathbf{w}^T \mathbf{x} \quad (\text{式 3-10})$$

\mathbf{Q} : 二次近似行列

\mathbf{c} : 線形係数ベクトル

\mathbf{w} : 戦略ベクトル

また制約条件式はスラック変数 s を導入し、以下のようになる。

$$\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b} + \mathbf{s} = \mathbf{0} \quad (\text{式 3-11})$$

さらにラグランジュ乗数 $\boldsymbol{\mu}$ （リデューストコスト）を加えたラグランジュ関数を用意する。

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{x} \quad (\text{式 3-12})$$

以上を用いて、先の Kuhn-Tucker 条件を書き直すと

$$\square_{\mathbf{x}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{c} + \mathbf{w} - \mathbf{A} \boldsymbol{\lambda} - \boldsymbol{\mu} = \mathbf{0} \quad (\text{式 3-13})$$

$$\square_{\mathbf{s}} L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b} - \mathbf{s} = \mathbf{0} \quad (\text{式 3-14})$$

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\mu} \geq \mathbf{0}, \boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{0}, \mathbf{s} \geq \mathbf{0} \quad (\text{式 3-15})$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T (\mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{b}) = 0, \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{x} = 0 \quad (\text{式 3-16})$$

となる。この式が本モデルの最適化問題における必要十分条件となる。

3-2-3. Kuhn-Tucker 条件を用いた感度解析

上記の Kuhn-Tucker 条件を用いた、戦略ベクトル更新の際の感度解析を考える。戦略ベクトルを更新することで、最適性の必要条件である（式 3-13）も変形する。戦略ベクトルを Δw だけ更新し、

$$w \rightarrow w + \Delta w \quad (\text{式 3-17})$$

となった状態を考える。この状態で最適問題を解いた際、出てくる他の変数解も微小変動し

$$x \rightarrow x + \Delta x \quad (\text{式 3-18})$$

$$\mu \rightarrow \mu + \Delta \mu \quad (\text{式 3-19})$$

$$\lambda \rightarrow \lambda + \Delta \lambda \quad (\text{式 3-20})$$

$$s \rightarrow s + \Delta s \quad (\text{式 3-21})$$

となったとする。各変数は微小変動後も最適均衡解となっているはずであるから、Kuhn-Tucker 条件を満たすはずである。そこで Kuhn-Tucker 条件式に（式 3-18）～（式 3-21）を代入し、元の式（式 3-13）～（式 3-16）を引いて整理すると、各変数の微小変動に対する Kuhn-Tucker の必要十分条件式が導出される。

$$Q\Delta x + \Delta w - A\Delta \lambda - \Delta \mu = 0 \quad (\text{停留点条件}) \quad (\text{式 3-22})$$

$$A\Delta x - \Delta s = 0 \quad (\text{実行可能性}) \quad (\text{式 3-23})$$

$$x + \Delta x \geq 0, \mu + \Delta \mu \geq 0, \lambda + \Delta \lambda \geq 0, s + \Delta s \geq 0 \quad (\text{非負制約}) \quad (\text{式 3-24})$$

$$(\lambda + \Delta \lambda)(s + \Delta s) = 0, (\mu + \Delta \mu)(x + \Delta x) = 0 \quad (\text{相補性}) \quad (\text{式 3-25})$$

（式 3-22）に関して、 Δx の二次の項は十分小さいとして線形近似を行っている。

戦略ベクトルの更新成分 Δw と最適均衡解の更新成分 Δx はこの式によって関係づけられる。（式 3-22）～（式 3-25）を各変数の微小変動項に対する連立方程式と見なし、解くことによって解析的に Δw と Δx の関係を導くことができる。この Δw と Δx の関係を解析的に得ることを本研究では感度解析と呼ぶ。

3-2-4. 感度解析による最適化問題の作成

Kuhn-Tucker 条件式から得られた各微小変動項に関する関係式を用いて、以下の最適化問題を考える。

$$\text{目的関数} \quad \left| \sum_{p \in i} \Delta w_{i,p}^2 + 10^6 z \right| \rightarrow \min \quad (\text{式 3-26})$$

$$\text{制約条件式} \quad Q\Delta x + \Delta w - A\Delta \lambda - \Delta \mu = 0 \quad (\text{式 3-27})$$

$$A\Delta x - \Delta s = 0 \quad (\text{式 3-28})$$

$$\Delta \lambda \Delta s = 0 \quad (\text{式 3-29})$$

$$\Delta \mu \Delta x = 0 \quad (\text{式 3-30})$$

$$\text{if } (j \neq i) \Delta w_j = 0 \quad (\text{式 3-31})$$

$$\Delta R_i = (c^T + Qx_i - \lambda_i^T A)\Delta x_i - \Delta \lambda_i^T Ax_i + \Delta \lambda_i^T b_i' + (-\alpha R_i)z = -\alpha R_i \quad (\text{式 3-32})$$

$w_{i,p}$: 第*i*エージェントの戦略ベクトル更新成分 (第*p*成分)

R_i : 第*i*エージェントの報酬関数

α : 報酬関数の更新割合[%]

z : 保険変数

x_i : 第*i*エージェントの持つ変数ベクトル

※以降、全地域のエージェントを全て通し番号*i*で表現する

制約条件式の (式 3-27) ~ (式 3-30) が Kuhn-Tucker 条件式を表している。それぞれ (式 3-27) が停留点条件、(式 3-28) が実行可能性、(式 3-29) (式 3-30) が相補性を表している。相補性に関しては、各変数に対して、基底、非基底変数のどちらになっているか判別し、非基底変数に入っている方の変数成分を 0 とするようにした。また非負制約に関しては、元の変数値に対して、微小変動項が十分小さいとして割愛した。(式 3-31) は戦略を取るエージェント (第*i*エージェント) が持つ戦略成分以外は更新できないことを表している。(式 3-32) は戦略を取るエージェントの報酬関数が一定割合 ($\alpha\%$) 改善されることを意味している。尚 (式 3-32) における変数ベクトル x_i による最適化問題中では定数として扱われる。

以上の制約条件を満たす中で、その和の絶対値が最小になるような戦略ベクトル更新項群を見つけることを目的とした。

$$\begin{pmatrix} Q & -E & -A^T & 0 & E & 0 \\ A & 0 & 0 & E & 0 & 0 \\ E' & E'' & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E''' & E'''' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E^* & 0 \\ c + Qx_i - \lambda_i A & 0 & -Ax_i + b_i & 0 & 0 & \alpha R_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \mu \\ \Delta \lambda \\ \Delta s \\ \Delta w \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \alpha R_i \end{pmatrix}$$

図 3-3：感度解析による最適化問題の制約条件式の行列表現

※ E', E'', E''', E'''' はそれぞれ各変数ベクトルの中で非基底変数に含まれる変数成分に対応する部分にのみ値を持つ対角行列である。

最急降下法

感度解析における最適化問題の目的関数の最小化は最急降下法の応用と考えることができる。最急降下法とは、定められたある関数（ここでは戦略をとるエージェントの報酬関数）の変化率に対して、最短でその変化率を得られる方向へ移動する方法である^[8]。式 3-32) で定められた報酬関数の改善を満たす中で、最小の戦略更新ベクトルを得ることができる。

つまり戦略を取るエージェントは、感度解析による最適問題を解くことで、事前に最適とされる戦略行動に対する情報を得ることができ、効率よく戦略行動を取ることができるようになる。

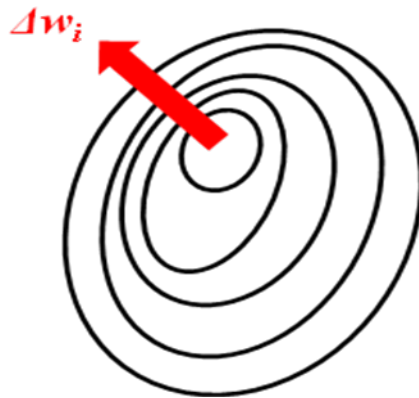


図 3-3. 最急降下法による戦略更新ベクトルの決定

最急降下法における注意点

感度解析によって、解析的に取るべき戦略更新ベクトルを得ることが出来るため、戦略をとるエージェントは必ず報酬関数を改善できるように思える。しかし解析的に得た戦略更新ベクトルを採用しても、報酬関数が改善されない場合もある。これは最急降下法が、エージェントのその時点での報酬関数の傾きを元に最適な更新成分を判断する方法であるのに対して、報酬関数は非線形であり、必ずしも傾きが一定ではないためである。この場合（式 3-32）の報酬関数の更新割合 α の値を適宜調節する必要がある。

コスト関数（報酬関数の逆符号）

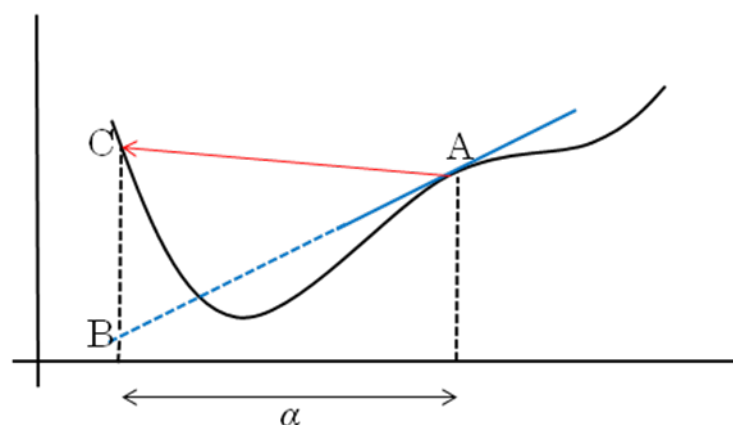


図 3-4：最急降下法による報酬関数の改善

エージェントは点 A で戦略を取る場合、点 A における傾きを元に最適な戦略更新成分を決定する。この時エージェントは戦略更新により点 B に遷移し、報酬関数を改善（コストを減少）させると判断するが、報酬関数の傾きが一定でないため、実際には点 C に遷移してしまい、報酬関数は悪化してしまうこととなる。

3-2-5. 計算フロー

戦略決定の際に感度解析を用いた最適化問題を解く必要があるため、本モデル内では、一度の試行で、

- i. 世界全体のコストの最適化問題
- ii. 戦略決定のための感度解析による最適化問題

の2つの最適化問題を解くことになる。プログラム全体での計算フローを以下に示す。

①世界最適化問題を解き、最適解ベクトル \mathbf{x}^* を得る

$$J = \sum_i f_i(\mathbf{x}_i) \rightarrow \min$$

$$\mathbf{Ax} \geq \mathbf{b}$$

②最適均衡解ベクトル \mathbf{x}^* を用いて各エージェントの報酬関数を計算する

$$R_i = -f_i(\mathbf{x}_i^*) + \lambda(A_i \mathbf{x}_i^* - \mathbf{b}_i) + \lambda'(T_i \mathbf{x}_i^* - \mathbf{e}_i)$$

③戦略行動を取る（戦略ベクトルを更新させる）エージェントを決める

④感度解析による最適化問題を解き、戦略更新ベクトルを得る。

⑤④の戦略が反映された状態での世界最適化問題を解き、新たな最適均衡解ベクトル \mathbf{x}^* を得る

$$J = \sum_i \{f_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{w}_i \mathbf{x}_i\} \rightarrow \min$$

$$\mathbf{Ax} \geq \mathbf{b}$$

※以下②に戻り②～⑤を繰り返す

第4章 計算結果(1)

第3章で述べた感度解析を用いた戦略更新による試行結果を以下に示す。感度解析による戦略探索により、少ない探索回数で均衡状態へ到達できることが期待される。シミュレーションは日本国内に注目した日本国内のエージェントのみが戦略をとるケースを行った。

4-1. 日本国内のエージェントのみが戦略をとるケース

以下に日本国内のエージェントのみが戦略をとったケースの計算結果を示す。2010、2020、2030年の3時点を対象とし、以下のCO₂排出制約をかけた。計算回数は8000回とした。なお0回目の値が戦略を取らなかった場合のコストである。また感度解析計算時の報酬関数の更新割合は $\alpha=0.5\%$ とした。

表 4-1 : CO₂排出制約^[9]

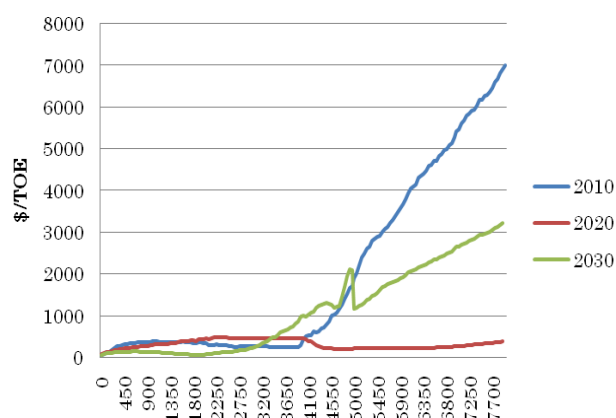
※各年次のCO₂排出量上限比(2000年比)

	2010年	2020年	2030年
北アメリカ	なし	93%	93%
西ヨーロッパ	92%	92%	92%
日本	94%	94%	94%
オセアニア	なし	108%	108%
計画経済圏アジア	なし	なし	なし
その他アジア	なし	なし	なし
中東・北アフリカ	なし	なし	なし
サブサハラ以南のアフリカ	なし	なし	なし
ラテンアメリカ	なし	なし	なし
旧ソ連・東ヨーロッパ	100%	100%	100%

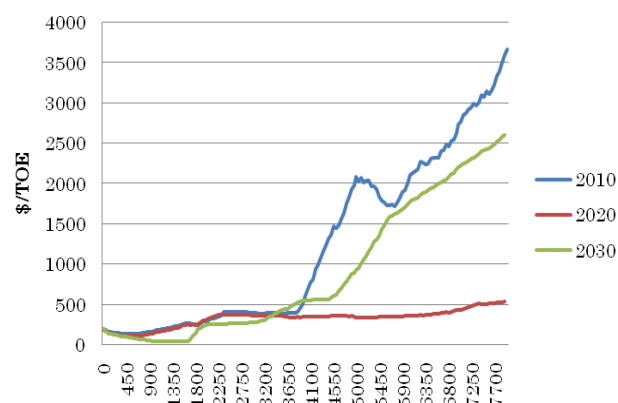
表 4-2 : 感度解析時の更新割合 α [%]

α	0.5	[%]
----------	-----	-----

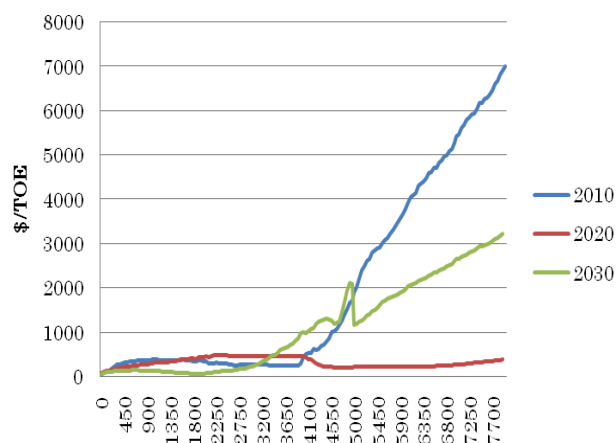
各エージェントの戦略行為による国内での各種資源の取引価格の遷移の様子をしめす。どの資源も戦略を繰り返すにつれて価格が高騰しているのが見て取れる。これは各資源の市場が独占状態となってしまうために価格の吊り上げ戦略が続けられてしまっているためと考えられる。また電力価格も各資源の高騰に合わせるかのように価格を上げている。



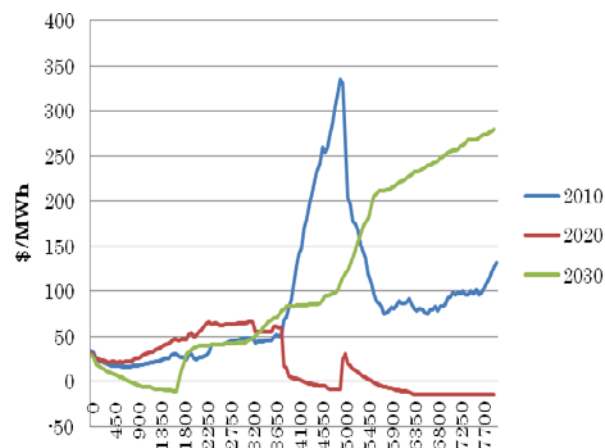
a : 国内の石油価格



b : 国内の天然ガス価格



c : 国内の石炭価格

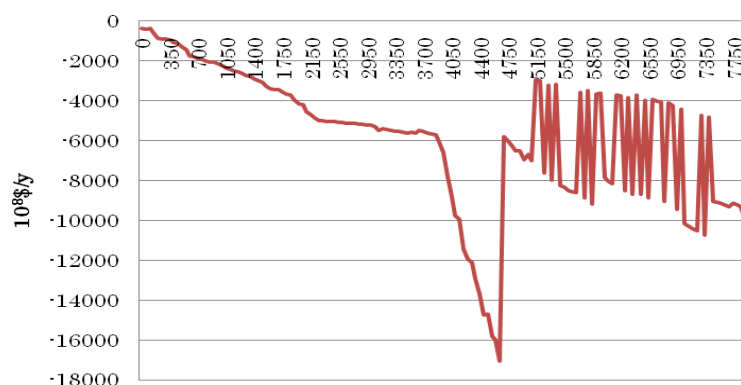


d : 国内の電気価格

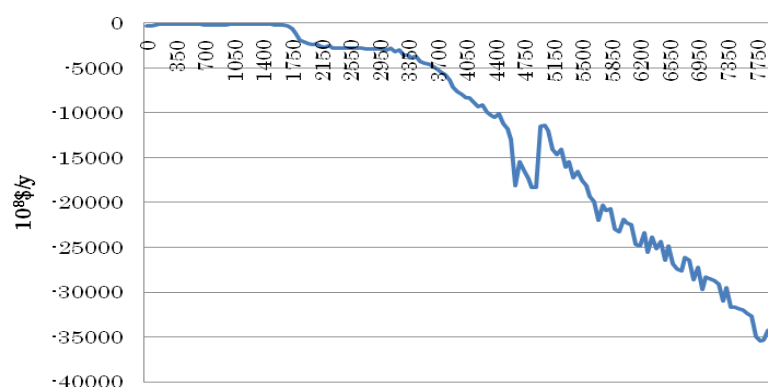
図 4-1 : 各資源の国内取引価格の遷移

※横軸は計算回数

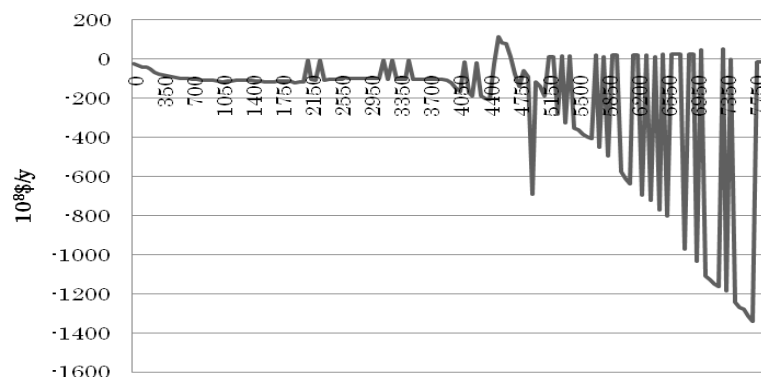
次に国内の各エージェントの報酬関数の遷移の様子を示す。なお以下のグラフではコストを正としているため、このグラフの値に負符号をつけたものが、各エージェントの真の報酬関数の値となる。価格つり上げの戦略をとった各資源業者が大きく値を下げている。また 4500 回目以降辺りから各エージェントの報酬関数が上下に大きく振れだしている。これは各資源の取引価格が高騰しすぎているために、少しの戦略行為で報酬が大きく変化してしまうためだと考えられる。



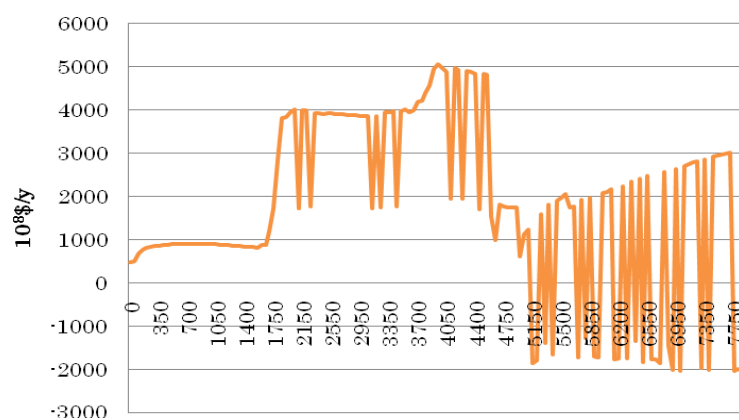
a : 石油業者



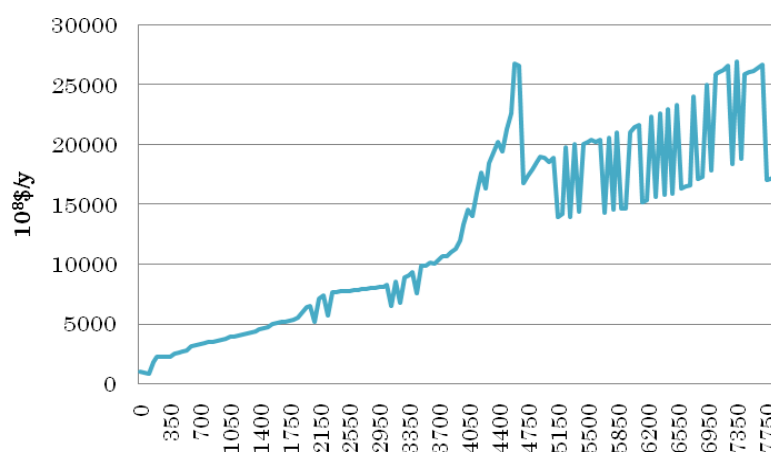
b : 天然ガス業者



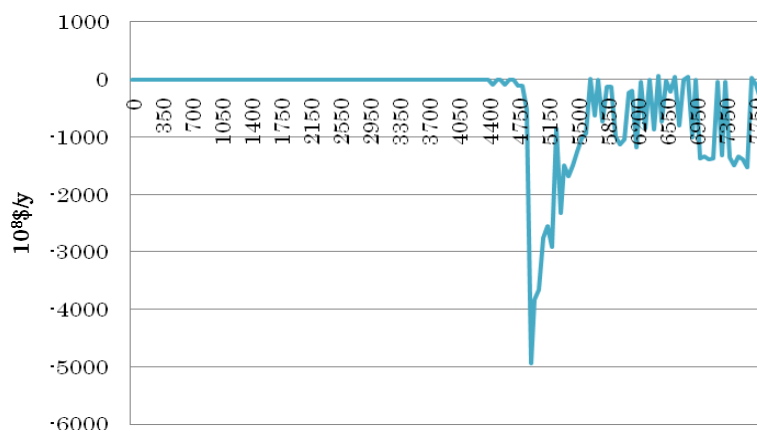
c : 石炭業者



d : 電気事業者



e : 消費者



f : 水素業者

図 4・2 : 日本国内の各エージェントの報酬関数

戦略を繰り返すにつれて各種資源の価格が高騰しており、それにつれて石油業者、天然ガス業者、石炭業者の報酬関数が大きく改善されていることが見て取れる。一方資源を消費する側の消費者と電気事業者の報酬関数が悪化している。電気事業者は、電気価格を高騰させることで対応しようとしているが対応しきれていない。電気事業者は各化石燃料の高騰を受け、比較的安価な水素を燃料に選択することとなる。この結果水素業者による水素の輸入販売が行われ、水素業者は報酬関数を改善することとなった。これにより発電における天然ガスの消費量が減るが、天然ガス業者は天然ガスを安価な価格で輸入して来てガススプリッティングによって水素を作り、その水素を販売することで大きな利益をあげている。その結果国内の天然ガスの供給量は増加している。また、ガススプリッティングや資源の消費増大に伴うCO₂回収の必要性の増加によって、それらに用いられる電力量も増加してしまい、結果日本全体の総コストは桁違いに膨らんでしまっている。

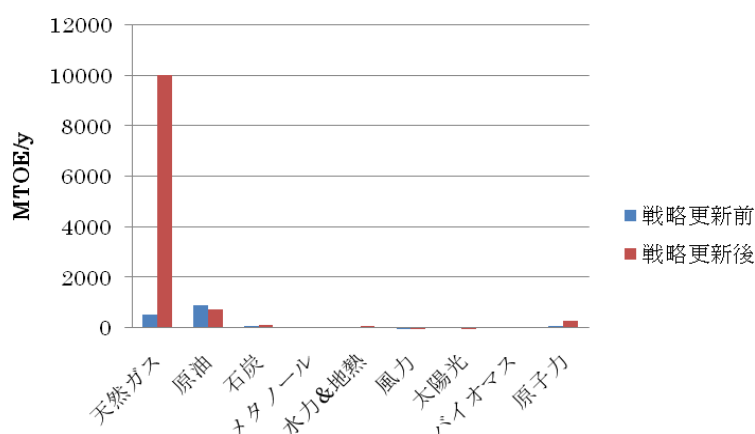


図 4-3：日本国内の総エネルギー供給量
※3 時点の供給量の総和

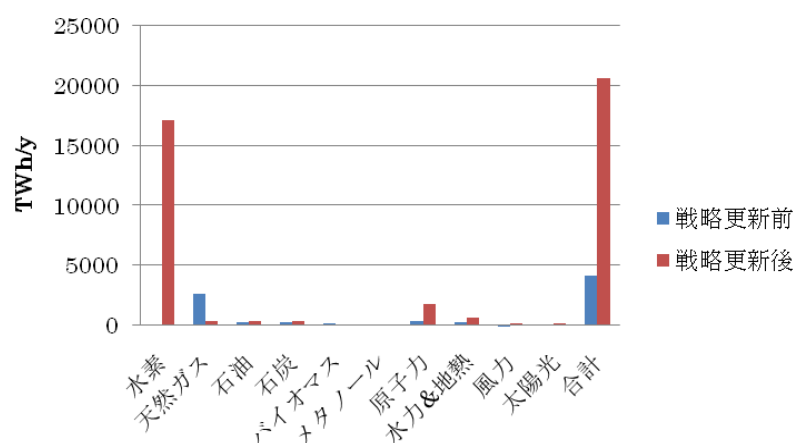


図 4-4：日本国内の資源別発電量
※3 時点の供給量の総和

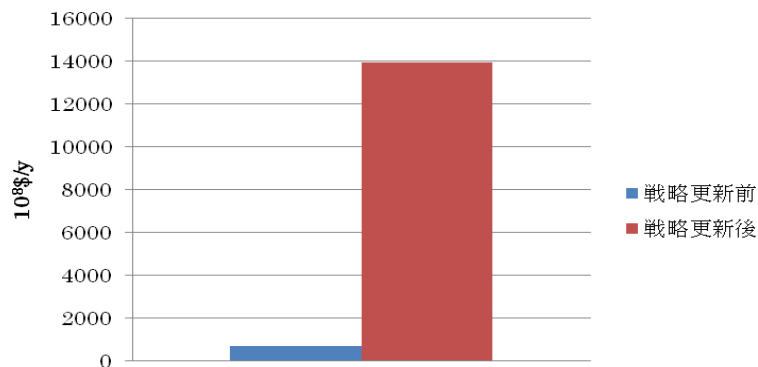


図 4-5：日本の総コスト

4-2. 問題点と改善すべき点

前節でしめした感度解析による戦略探索をおこなったところ、各種資源価格の高騰という結果になった。これは想定したエージェントが各業種において一人ずつしかいなかったために、市場が独占市場状態となったためと考えられる。供給側である各資源業者が報酬関数を大きく改善し、そのあおりを受ける形で消費する側の消費者、電気事業者の報酬関数が悪化した。戦略を通しての各エージェントの報酬関数の変化の差が大きく、また消費エネルギーでも圧倒的に水素と天然ガスが増加し、日本全体の総コストは 100 倍にも膨らんでしまった。

このような状態を回避するためには、各エージェントの市場支配力を弱めることが必要となる。そこで、同一地域内に複数の同業者のエージェントが存在し、互いに競合しあうモデルに書き換えることを考える。複数の同業者を想定することで同一市場においても競合が生じ、寡占状態を形成することで価格の上昇を抑えることが可能になると考えられる。また想定する同業者の人数を変化させることで、モデル内の市場が独占、寡占、完全競争状態となった時の均衡価格なども知ることができるように考えられる。本モデルでは 10 地域 11 エージェントを想定しておりこれだけですでに合計 110 人のエージェントが存在する。これ以上エージェントを増やすことは、変数を増やし解くべき最適化問題の巨大化を意味する。例えば 2 人ずつ同業者を想定するだけでも変数の数は 2 倍となり、問題の大きさも 2 倍となってしまう。そこで本研究では感度解析問題を書き換えることで、同業者の競合を疑似的に表現する方法を考えた。次章でその詳細を述べる。

第5章 複数の同業者を想定した感度解析

前章の結果に見るように感度解析による戦略更新は、各資源業者の市場独占状況を生み出し、資源価格の高騰が止まらないという結果を生じた。そこで、同一市場に複数の同業者が存在し、競合するモデルへの改善が必要であると考えた。

本章では、第3章で論じた感度解析による最適化問題を改良し、複数の同業者の競合を反映できるモデルへの書き換えの詳細を記す。

5-1. 複数の同業者の存在

5-1-1. n 人の同業者のモデルへの組み込み

同一地域内の各事業者の人数をそれぞれ n 人ずつにし、競合させる世界を考える。モデル内のエージェントの人数を n 倍にすることでこれを表現しようとする、それに対応するように変数 x の総数も n 倍に増やす必要があるため、プログラム自体が極端に重くなってしまう可能性がある。また、同業者の人数である n の値を変える度に、モデル自体の大きさも変化させる必要があり、柔軟に n の値を変化させづらくなってしまう。

$$\begin{aligned} f &= c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_px_p + \cdots \\ \rightarrow f &= c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_{p,1}x_{p,1} + c_{p,2}x_{p,2} + \cdots + c_{p,n}x_{p,n} + \cdots \end{aligned}$$

図 5-1 : 変数を増やすことで n 人の同業者の存在を表現した場合

同業者の存在により変数が増えることで、これまで目的関数係数の c_p 成分に戦略をかけていたエージェントは、 $c_{p,1}$ 成分にのみ戦略をかけることになる。この場合同業他者の持つ $c_{p,2}, c_{p,3}, \dots, c_{p,n}$ には戦略はかからないため、消費側は戦略のかかっていない変数 x を選択できることになる。これにより各エージェントの市場独占力は弱まり、競合状態を表現できると考えられる。しかしそのためには変数の数を変化させなくてはならず、 n の値次第でモデルは巨大なものになってしまう。

5-1-2. 同業他者との競合

各エージェントの同業他者との競合は戦略選択の際に生じる。そこで感度解析による最適化問題に n をパラメータとして組み込むことで、同業者が n 人いる状況下での最適戦略更新ベクトルを各エージェントが得られるようにする。各エージェントは戦略選択の時だけ、同業者の存在を考慮する。この手法を用いることで変数 x の数を増やすことなく、擬似的に n 人の同業者との競合を含む世界を表現することができるようになる。

5-2. 複数の同業者の存在を考慮した感度解析

5-2-1. 変数の分離

まず変数 x を

- i. 戦略を取るエージェントのもつ変数
- ii. 戦略を取るエージェントの同業者のもつ変数
- iii. その他のエージェントのもつ変数

に分離する。

$$[x] = \begin{bmatrix} x_m & x_c \\ x_o \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_m \\ x_c \\ x_o \end{bmatrix}$$

x : 全変数ベクトル

x_m : 戦略を取るエージェントのもつ変数ベクトル

x_c : 戦略を取るエージェントの同業者のもつ変数ベクトル

x_o : その他エージェントのもつ変数ベクトル

図 5-2 : 変数の分離の様子

x_m と x_c は同じ成分をもつ変数ベクトルであり、変数分離によって感度解析の際の変数 x の数は x_m の成分数だけ増加する。

5-3. Kuhn-Tucker 条件の書き換え

5-3-1. 実行可能性（制約条件式）

変数ベクトル \mathbf{x} の分離によって、第 3 章の（式 3-14）も変化する。
まず世界コスト最適化問題の制約条件行列を式の意味ごとに以下のように分離する（行列の成分数は変わらない）。

$$[A] = \begin{bmatrix} A^r \\ A^t \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} A_m^r & A_o^r \\ A_m^t & A_o^t \end{bmatrix}$$

A : 世界コスト最適化問題の制約条件行列

A^r : 資源制約行列

A^t : 市場制約行列

A_m^r : 戦略をとる事業者（とその同業者）に関わる資源制約行列成分

A_o^r : その他の事業者に関わる資源制約行列成分

A_m^t : 戦略をとる事業者（とその同業者）に関わる市場制約行列成分

A_o^t : その他の事業者に関わる市場制約行列成分

図 5-2 : 制約条件行列の分離

資源制約：事業者個々に対する制約

各エージェントの各種資源の生産上限を表している制約条件式は、以下のようになる。

[戦略をとるエージェントに対する資源制約]

$$A^r_m \mathbf{x}_m + \frac{1}{n} A^r_o \mathbf{x}_o - \frac{1}{n} \mathbf{b}^r - \mathbf{s}^r = 0 \quad \rightarrow \lambda^r_m \quad (\text{式 5-1})$$

[戦略をとるエージェントの同業者に対する資源制約]

$$A^r_m \mathbf{x}_c + \frac{1}{n} A^r_o \mathbf{x}_o - \frac{1}{n} \mathbf{b}^r - \mathbf{s}^r = 0 \quad \rightarrow \lambda^r_c \quad (\text{式 5-2})$$

\mathbf{b}^r ：資源制約式の右辺定数項ベクトル

\mathbf{s}^r ：資源制約式のスラック変数ベクトル

λ^r_m ：戦略をとるエージェントの資源制約条件式に対するシャドープライスベクトル

λ^r_c ：同業者の資源制約条件式に対するシャドープライスベクトル

(式 5-1) (式 5-2) はそれぞれ、戦略をとるエージェントに対する制約条件式とその同業者 1 人あたりに対する制約条件式を表している。第 2、3 項にそれぞれ $1/n$ を乗じているのは、 n 人いる同業者の一人あたりの制約条件式のため、その他のエージェントによる影響を n 等分していることを表している。

市場制約：市場全体での制約

各資源の市場取引（需給）のバランスを表す市場制約条件式は、以下のようになる。

$$A^t_m \mathbf{x}_m + (n-1) A^t_m \mathbf{x}_c + A^t_o \mathbf{x}_o + \mathbf{b}^t - \mathbf{s}^t = 0 \quad \rightarrow \lambda^t \quad (\text{式 5-3})$$

\mathbf{b}^t ：市場制約式の右辺定数項ベクトル

\mathbf{s}^t ：市場制約式のスラック変数ベクトル

λ^t ：市場制約条件式に対するシャドープライスベクトル

第 2 項は戦略をとるエージェントの他に $(n-1)$ 人の同業者がいることを表している。

5-3-2. 停留点条件

第3章（式 3-13）の停留点条件も変化し、以下のようになる。

[戦略を取るエージェントに対する停留点制約条件式]

$$nQ_m x_m + c_m - A^r_m \lambda^r_m - A^t_m \lambda^t - \mu_m + w_m = 0 \quad (\text{式 5-4})$$

[戦略を取るエージェントの同業者に対する停留点制約条件式]

$$nQ_m x_c + c_m - A^r_m \frac{1}{n-1} \lambda^r_c - A^t_m \lambda^t - \mu_m = 0 \quad (\text{式 5-5})$$

[その他のエージェントに対する停留点制約条件式]

$$Q_o x_o + c_o - \frac{1}{n} A^r_o \lambda^r_m - \frac{1}{n} A^r_o \lambda^r_c - A^t_o \lambda^t - \mu_o + w_o = 0 \quad (\text{式 5-6})$$

Q_m : 戦略をとるエージェントに関する二次近似行列

Q_o : その他エージェントに関する二次近似行列

c_m : 戦略をとるエージェントに関する線形係数ベクトル

c_o : その他エージェントに関する線形係数ベクトル

μ_m : 戦略をとるエージェントに関するリデューストコストベクトル

μ_o : その他エージェントに関するリデューストコストベクトル

w_m : 戦略をとるエージェントに関する戦略ベクトル

w_o : その他エージェントに関する戦略ベクトル

（式 5-4）（式 5-5）ともにエージェント 1 人に対する式のため、第 1 項を n 倍し、局所最適点への遷移の傾きを補正している（図 5-3 参照）¹⁹。また（式 5-5）において λ^r_c を $1/(n-1)$ 倍しているのは、

（式 5-2）の性質より、得られるシャドープライスベクトル λ^r_c が同業者 1 人しかいないときの値となっているため、 $(n-1)$ 人いる時の価格に補正することを意味している。（式 5-6）の第 3、4 項も同様の理由で $1/n$ 倍している。

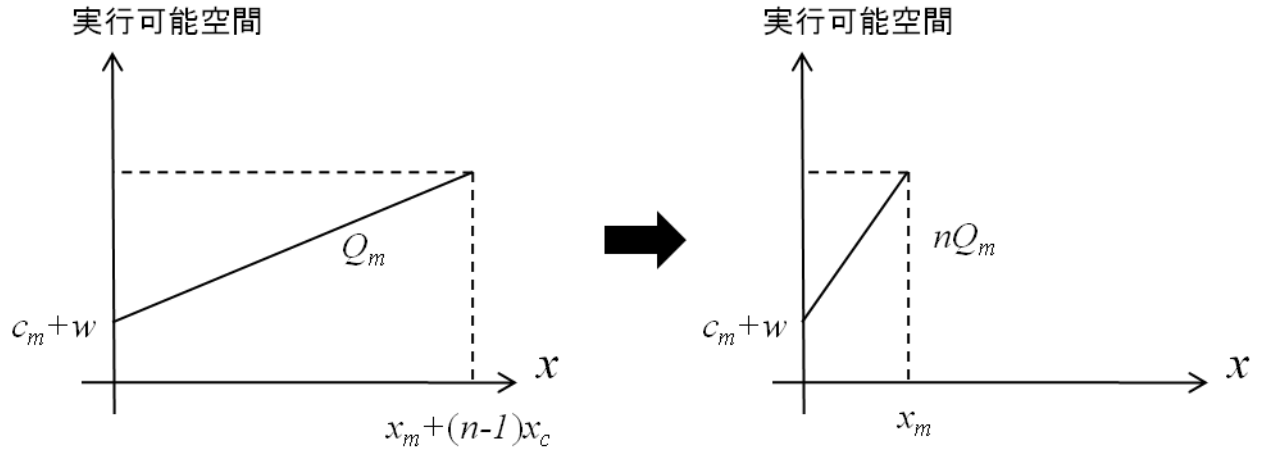


図 5-3：停留点条件における遷移の傾きの補正の概念図

※元の式の Q_m は「戦略をとるエージェント+ $(n-1)$ 人の同業者」全体に対する値のため、エージェント 1 人あたりを考える場合、傾きに対して n 倍の補正が必要となる。

5-3-3. 相補性

変数 \mathbf{x} の分離に合わせ分離されたラグランジュ乗数、スラック変数それぞれに対し以下の相補性がかかることになる。

$$\mathbf{x}_m \boldsymbol{\mu}_m = 0 \quad (\text{式 5-7})$$

$$\mathbf{x}_c \boldsymbol{\mu}_c = 0 \quad (\text{式 5-8})$$

$$\mathbf{x}_o \boldsymbol{\mu}_o = 0 \quad (\text{式 5-9})$$

$$\mathbf{s}^r_m \boldsymbol{\lambda}^r_m = 0 \quad (\text{式 5-10})$$

$$\mathbf{s}^r_c \boldsymbol{\lambda}^r_c = 0 \quad (\text{式 5-11})$$

$$\mathbf{s}^t \boldsymbol{\lambda}^t = 0 \quad (\text{式 5-12})$$

5-4. 最適化問題の作成

前章で書き換えた Kuhn-Tucker 条件を用いて、感度解析の最適化問題を作成する。

$$\begin{array}{l} \text{目的関数} \\ \text{制約条件式} \end{array} \quad \left| \sum_{p \in i} \Delta w_{i,p}^2 + 10^6 z \right| \rightarrow \min \quad (\text{式 5-13})$$

$$nQ_m \Delta x_m - A^r_m \Delta \lambda^r_m - A^t_m \Delta \lambda^t - \Delta \mu_m + \Delta w_m = 0 \quad (\text{式 5-14})$$

$$nQ_m \Delta x_c - A^r_m \frac{1}{n-1} \Delta \lambda^r_c - A^t_m \Delta \lambda^t - \Delta \mu_c = 0 \quad (\text{式 5-15})$$

$$Q_o \Delta x_o - \frac{1}{n} A^r_o \Delta \lambda^r_m - \frac{1}{n} A^r_o \Delta \lambda^r_c - A^t_o \Delta \lambda^t - \Delta \mu_o = 0 \quad (\text{式 5-16})$$

$$A^r_m \Delta x_m + \frac{1}{n} A^r_o \Delta x_o - \Delta s^r_m = 0 \quad (\text{式 5-17})$$

$$A^r_m \Delta x_c + \frac{1}{n} A^r_o \Delta x_o - \Delta s^r_c = 0 \quad (\text{式 5-18})$$

$$A^t_m \Delta x_m + (n-1)A^t_m \Delta x_c + A^t_o \Delta x_o - \Delta s^t = 0 \quad (\text{式 5-19})$$

$$\Delta x_m \Delta \mu_m = 0 \quad (\text{式 5-20})$$

$$\Delta x_c \Delta \mu_c = 0 \quad (\text{式 5-21})$$

$$\Delta x_o \Delta \mu_o = 0 \quad (\text{式 5-22})$$

$$\Delta s^r_m \Delta \lambda^r_m = 0 \quad (\text{式 5-23})$$

$$\Delta s^r_c \Delta \lambda^r_c = 0 \quad (\text{式 5-24})$$

$$\Delta s^t \Delta \lambda^t = 0 \quad (\text{式 5-25})$$

$$(c + nx_m Q_m - \lambda^r_m A^r_m - \lambda^t A^t_m) \Delta x_m - (A^r_m x_m + \frac{1}{n} b^r_m) \Delta \lambda^r_m - (A^t_m x_m + \frac{1}{n} b^t_m) \Delta \lambda^t = \alpha R_i \quad (\text{式 5-26})$$

R_i : 第*i*エージェントの報酬関数

α : 報酬関数の更新割合[%]

z : 保険変数

$$\begin{bmatrix}
nQ_m & 0 & 0 & -E & 0 & 0 & A_m^r & 0 & A_m^t & 0 & 0 & 0 & E \\
0 & Q_o & 0 & 0 & -E & 0 & \frac{1}{n}A_o^r & \frac{1}{n}A_o^r & A_o^t & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & nQ_m & 0 & 0 & -E & 0 & \frac{1}{n-1}A_m^r & A_m^t & 0 & 0 & 0 & 0 \\
A_m^r & \frac{1}{n}A_o^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -E & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{1}{n}A_o^r & A_m^r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -E & 0 & 0 \\
A_m^t & A_o^t & (n-1)A_m^t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -E & 0 \\
E' & 0 & 0 & E' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & E' & 0 & 0 & E' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & E' & 0 & 0 & E' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E' & 0 & 0 & E' & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E' & 0 & 0 & E' & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E' & 0 & 0 & E' & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\Delta x_m \\
\Delta x_o \\
\Delta x_c \\
\Delta \mu_m \\
\Delta \mu_o \\
\Delta \mu_c \\
\Delta \lambda_m^r \\
\Delta \lambda_c^r \\
\Delta \lambda^t \\
\Delta s_m^r \\
\Delta s_c^r \\
\Delta s^t \\
\Delta w_m
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
0
\end{bmatrix}$$

$$(c + nx_m Q_m - \lambda_m^r A_m^r - \lambda^t A_m^t) \Delta x_m - (A_m^r x_m + \frac{1}{n} b_m^r) \Delta \lambda_m^r - (A_m^t x_m + \frac{1}{n} b_m^t) \Delta \lambda^t = \alpha R_i$$

図 5-4：感度解析による最適化問題の制約条件式の行列表現（報酬関数に関する制約を除く）

※ E' は各変数ベクトルの中で非基底変数に含まれる変数成分に対応する部分にのみ値を持つ対角行列である。

◎感度解析問題を解くにあたって、二次行列 Q の0でない対角成分が非常に少なく、対角成分が0である列にあたる Δx_m と Δx_c の成分のみが値をとり、 Δw の成分がすべて0という最適解が多く見られた。 Δw の成分が全て0の場合、戦略ベクトルは更新されなくエージェントが戦略をとることができなくなってしまう。そこで本研究では、二次行列 Q の対角成分で0であるところに全て微小定数 q をいれることで、擬似的な最適解を得る手法をとった。これにより戦略更新ベクトルある Δw の成分も値を持つこととなり、戦略更新が可能となった。しかしこの方法は戦略更新の疑似最適解を得ることとなり、もしエージェントが既に最適状態にあり、報酬関数を改善する戦略更新ベクトルがない場合でも戦略を更新させてしまう可能性がある。戦略が更新され続ける結果、本当は均衡状態なのに市場での価格が収束しない場合も考えられる。

第 6 章 計算結果(2)

前章で述べた n 人の同業者を想定した感度解析による計算結果を示す。パラメータ n の値を変化させて行ったシミュレーション結果を比べることで、想定する同業者の人数が市場に与える影響を評価すると同時に、本モデルの妥当性を示した。さらに各資源の生産コストを変化させて行ったシミュレーション結果を比べることで、競合下での市場価格決定の要因を分析した。

6-1. 日本国内のエージェントのみが戦略をとるケース

6-1-1. n 人のエージェントを想定したケース

まず日本国内のエージェントのみが戦略をとったケースの計算結果を示す。2010、2020、2030 年の 3 時点を対象とし、以下のCO₂排出制約をかけた。計算回数は 6000 回とした。なお 0 回目の値が戦略を取らなかった場合のコストであり、感度解析における各パラメータは以下のように定義した。

表 6-1 : CO₂排出制約^[10]

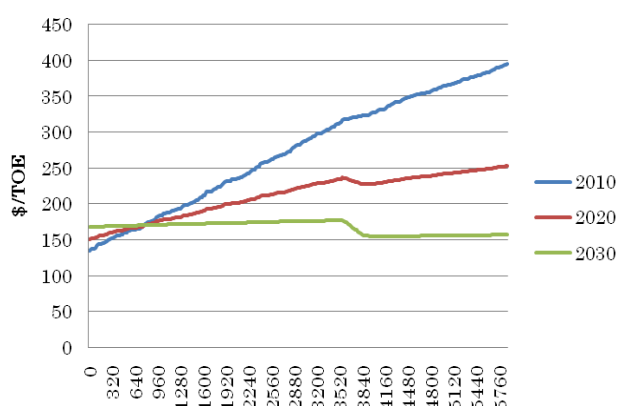
※各年次のCO₂排出量上限比(2000 年比)

	2010 年	2020 年	2030 年
北アメリカ	なし	93%	93%
西ヨーロッパ	92%	92%	92%
日本	94%	94%	94%
オセアニア	なし	108%	108%
計画経済圏アジア	なし	なし	なし
その他アジア	なし	なし	なし
中東・北アフリカ	なし	なし	なし
サブサハラ以南のアフリカ	なし	なし	なし
ラテンアメリカ	なし	なし	なし
旧ソ連・東ヨーロッパ	100%	100%	100%

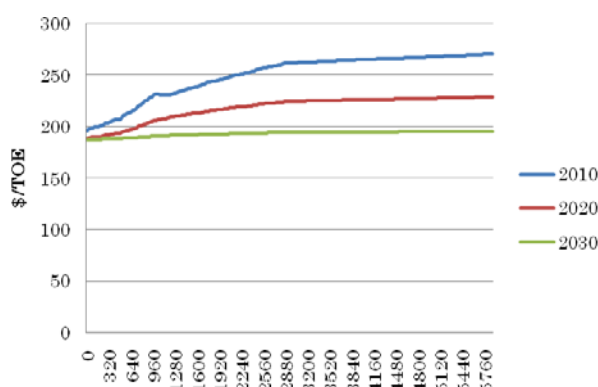
表 6-2 : 感度解析時のパラメータ

想定する同業者の人数	n	10	[人]
報酬関数の更新割合	α	0.5	[%]
行列 Q に入れる微小項	q	0.5	

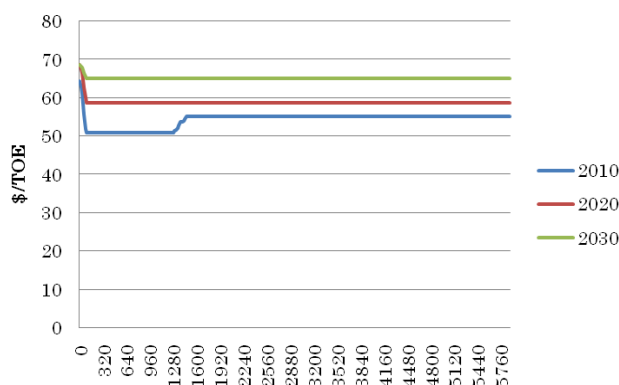
まず日本国内の各種資源の取引価格の遷移の様子を示す。各資源とも4章の結果に比べ価格の高騰がおさえられているのがわかる。これは感度解析時に想定した n 人の同業者による競合の影響がうまく表現された結果と考えることができる。また天然ガス、石炭、電力価格に関しては戦略探索によって価格が一定値に近付いている様子がうかがえる。この収束値が同業者が存在し競合しあった場合における各資源の市場均衡価格であると考えられる。また、2010、2020、2030年と時点を追うごとに価格の変化が緩くなっているのは、時点が先へ行けば行くほど、コストに割引率がかかってくるので価格戦略による報酬関数の改善幅が小さくなるため、価格戦略があまり行われなくなっているためと考えられる。



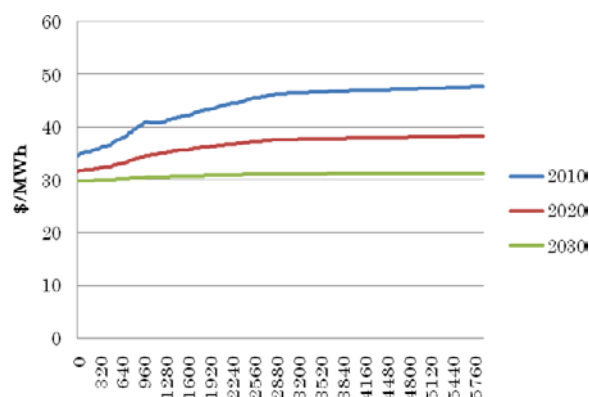
a : 国内の石油価格



b : 国内の天然ガス価格



c : 国内の石炭価格

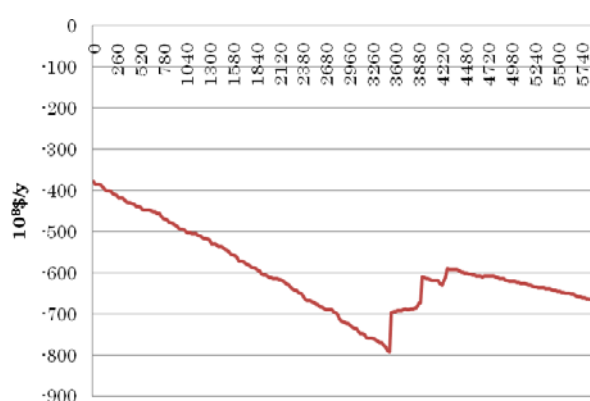


e : 国内の電力価格

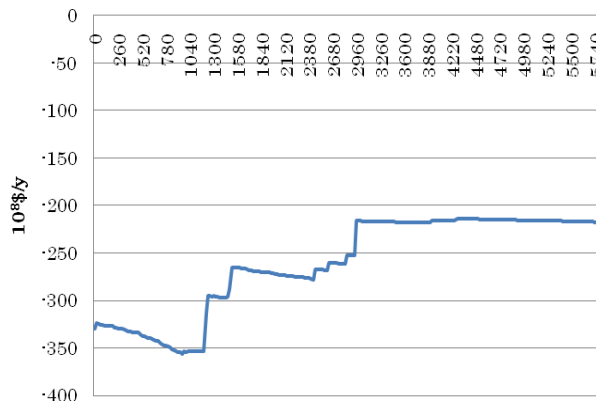
図 6-1 : 各資源の国内取引価格の遷移の様子

※横軸は計算回数

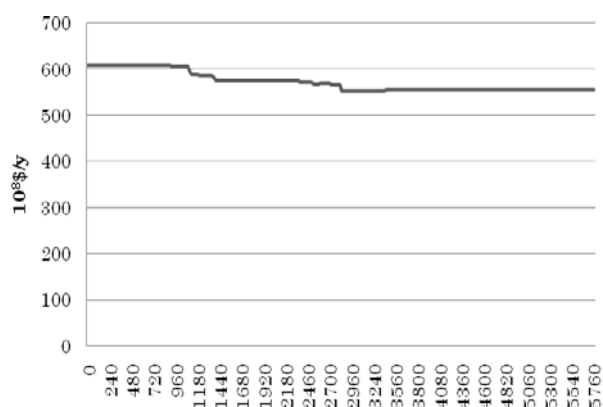
次に日本国内の各エージェントの報酬関数の遷移の様子を示す。グラフの値は、各業種における n 人の報酬の合計値と見ることができる。なお以下のグラフではコストを正としているため、このグラフの値に負符号をつけたものが、各エージェントの真の報酬関数の値となる。



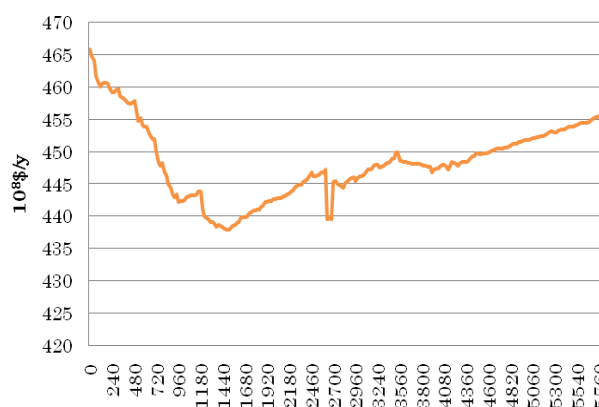
a : 石油業者



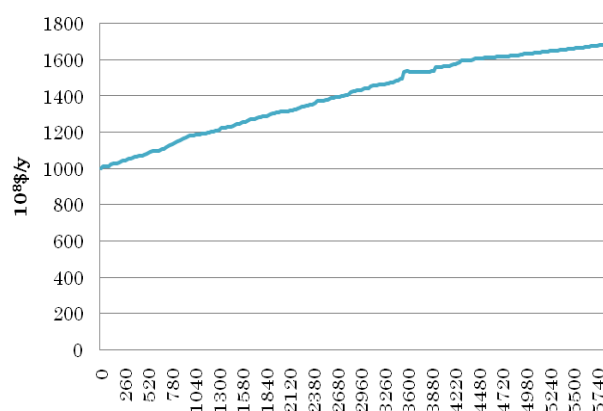
b : 天然ガス業者



c : 石炭業者



d : 電気事業者



e : 消費者



f : メタノール業者

図 6-2 : 日本国内の各エージェントの報酬関数(横軸は 10^8 \$/y)

戦略による各エージェントの報酬関数の変化を見ると、石油業者、事業者、石炭業者が報酬を改善しているのに対し、天然ガス業者、消費者の報酬関数が悪化している。競合関係にある石油業者とメタノール業者に関して見てみると、石油業者が石油価格をどんどん上げている。それによってメタノールとの価格差が小さくなっていき、3000回過ぎあたりから石油からメタノールへエネルギー変換が起き、メタノール業者の報酬が増加し、石油業者の報酬は逆に一時的に悪化している。最終的に国内の石油の消費量は戦略前の半分以下に減っているが、価格の上昇により報酬を改善していることがわかる。

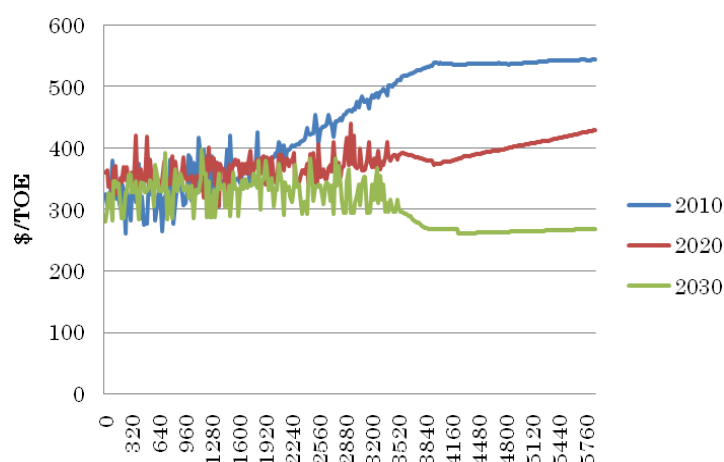


図 6-3：メタノール価格の推移

※石油との価格差が小さくなる 3000 回過ぎあたりからメタノールが導入され始め、それに伴い価格戦略を展開している様子がうかがえる

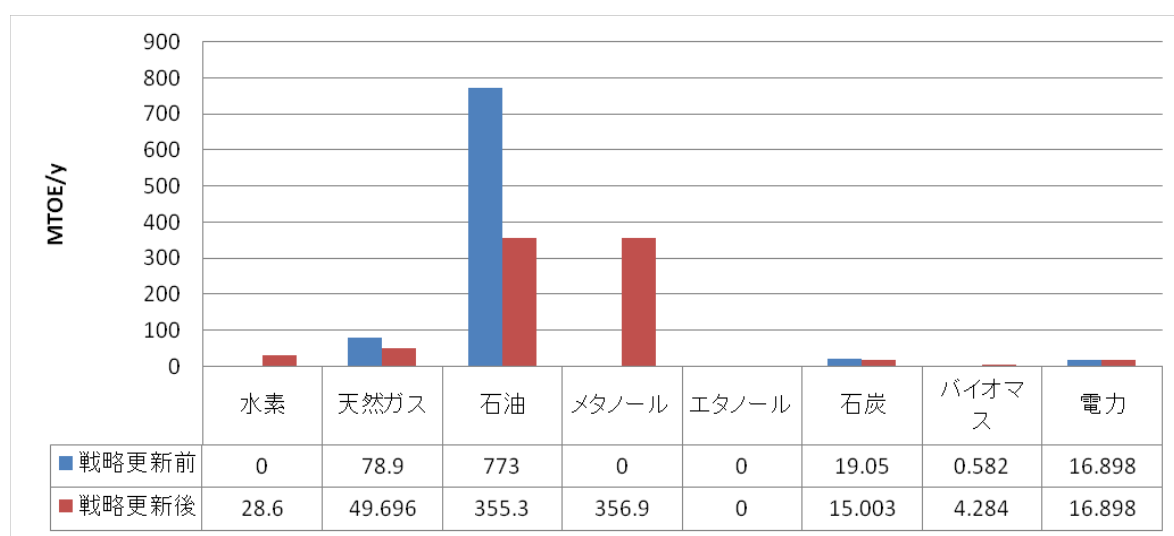


図 6-4：日本国内の各資源の 3 時点の合計消費量

石炭業者は石炭価格の下落に伴い石炭の輸入量を減らし、自国での生産量を増やすことで報酬関数をわずかばかり改善している。

電気事業者は価格が高騰する石油、天然ガスによる発電を控え、原子力、水力&地熱発電の割合を増やすことで報酬関数を改善しているのが見て取れる。反対に需要の減った天然ガス業者は報酬を悪化させている。

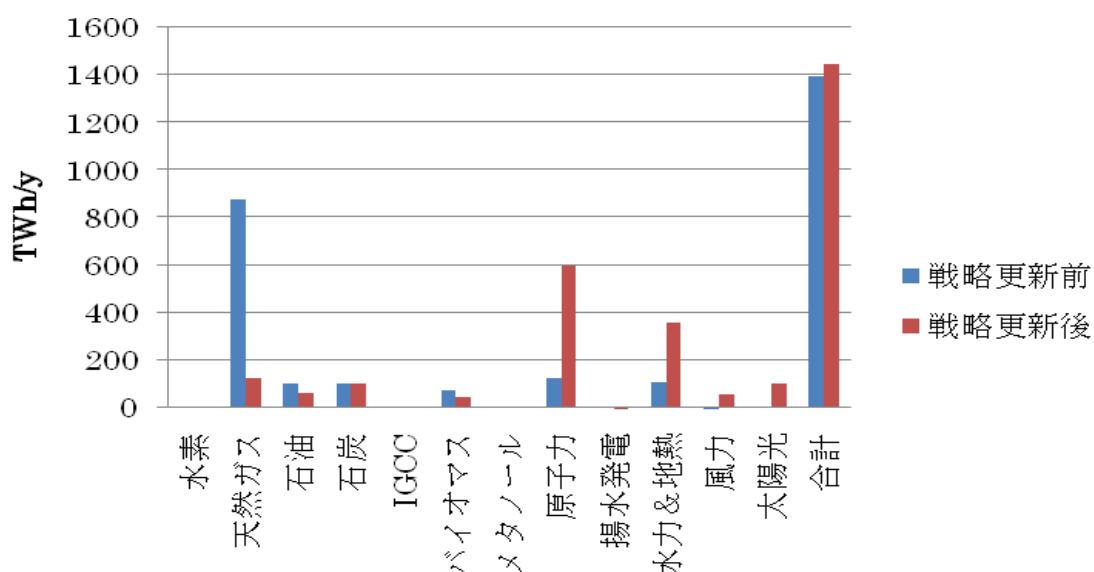


図 6-5：日本国内の各資源による平均発電量

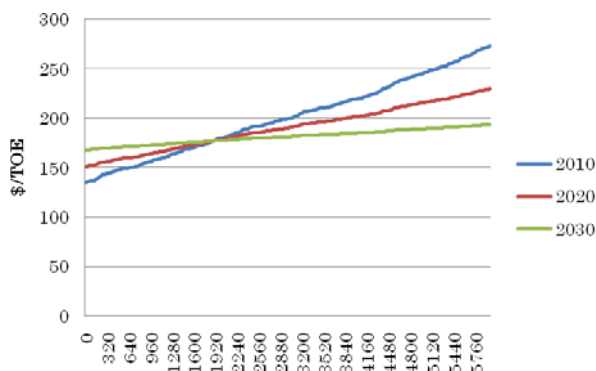
6-1-2. パラメータ n による影響

本モデルが感度解析時に n 人の同業者による競争を表現できたことを前節では示した。さて同業者による競争を考えると、その同業者の人数が多ければ多いほど、市場は独占市場→寡占市場→完全競争市場に近付いていくと考えられる。そこで本節では日本のエージェントのみ戦略をとるケースにおいて、同業者の人数 n による影響を評価することで本モデルの妥当性を考察する。

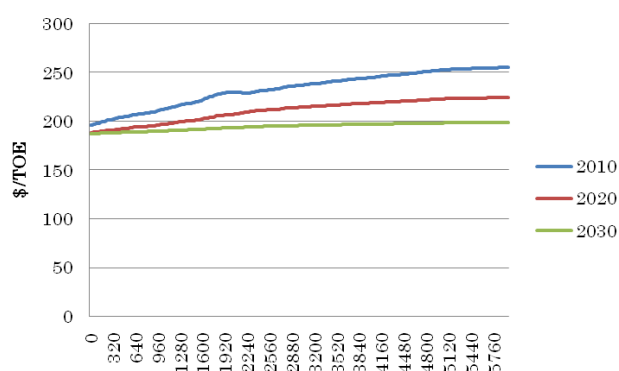
それぞれ $n=20$ 、50、100 とした時の計算結果を以下に示す。なお n 以外のパラメータは表 6-2 の値を用いた。

$n=20$ 人のケース

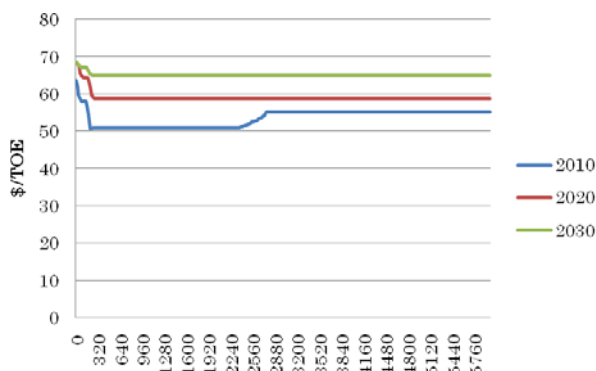
$n=10$ のケース（前節参照）に比べ、各資源の価格上昇が抑えられているのが見て取れる。特に石油価格は 2010 年時での価格上昇が半分ほどに抑えられている。



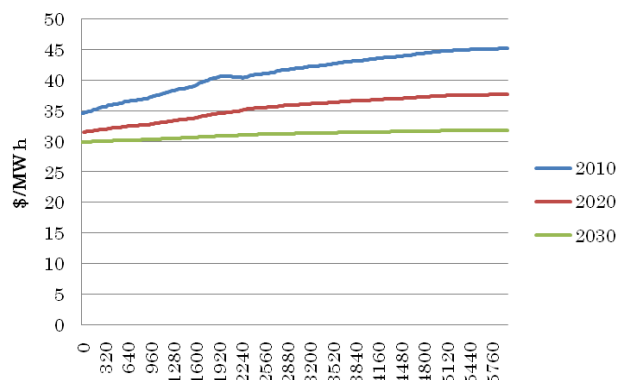
a : 国内の石油価格



b : 国内の天然ガス価格



c : 国内の石炭価格

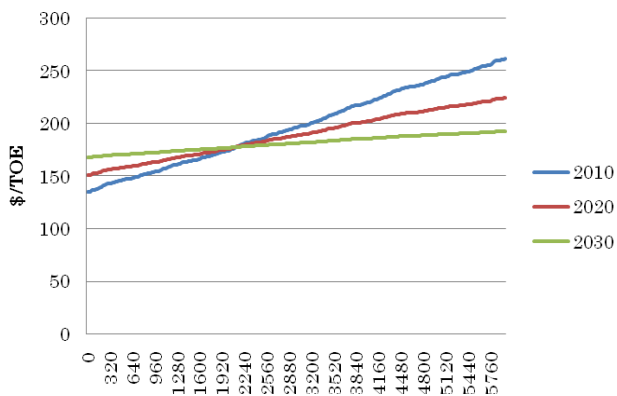


e : 国内の電力価格

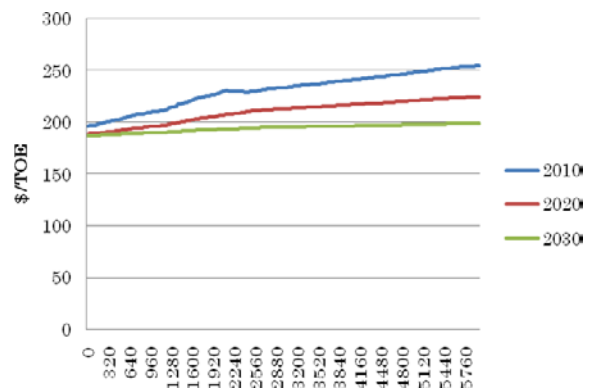
図 6-6 : 各資源の国内取引価格の遷移の様子

$n=50$ 人のケース

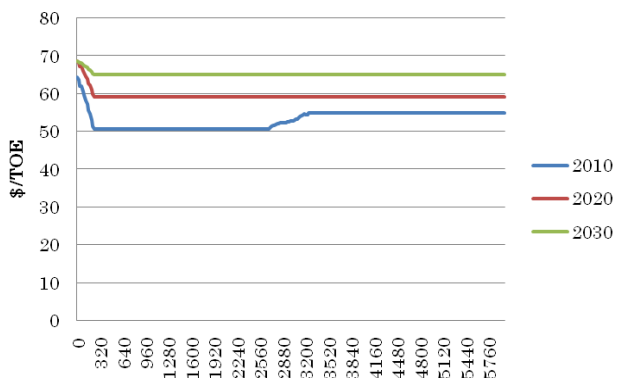
$n=10$ 、 20 のケースに比べさらに各資源の価格上昇が抑えられているのが見て取れる。しかし $n=20$ との差は小さく、 n の増加による価格への影響は小さくなっていることがわかる。これは市場が徐々に完全競争市場に近付いているためと考えることができる。



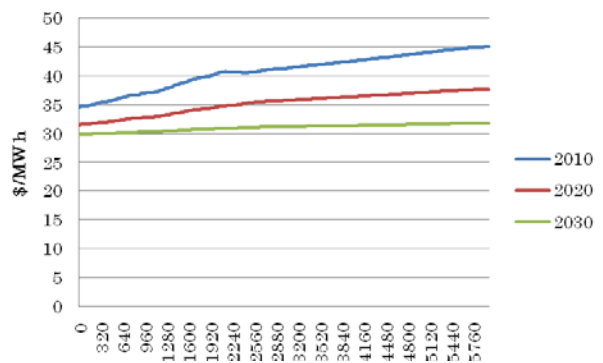
a : 国内の石油価格



b : 国内の天然ガス価格



c : 国内の石炭価格

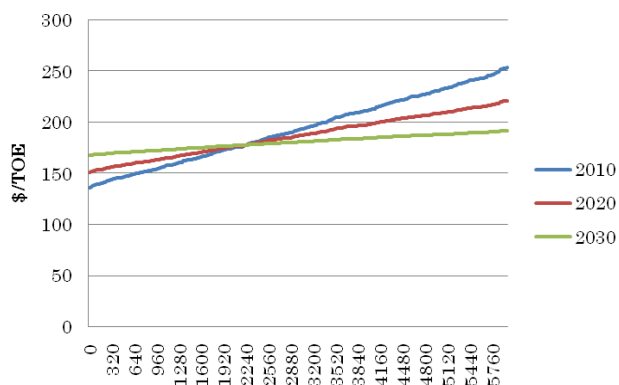


e : 国内の電力価格

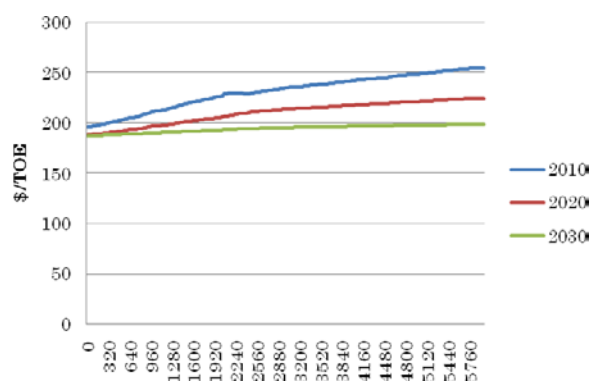
図 6-7 : 各資源の国内取引価格の遷移の様子

$n=100$ 人のケース

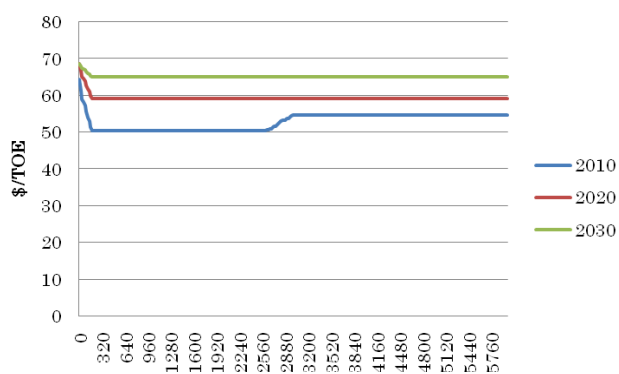
$n=50$ のケースと比べほぼ変わりがない。これは $n=50$ の時点でほぼ完全競争市場状態になっているためと考えられる。



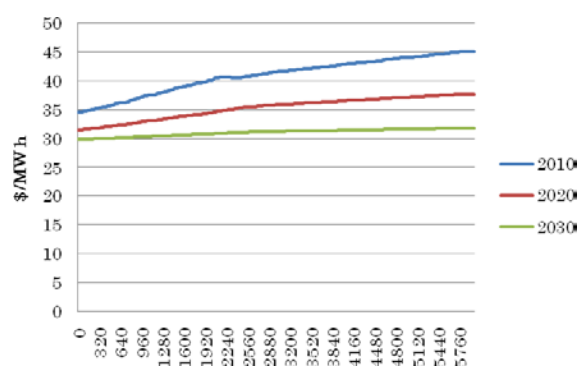
a : 国内の石油価格



b : 国内の天然ガス価格



c : 国内の石炭価格

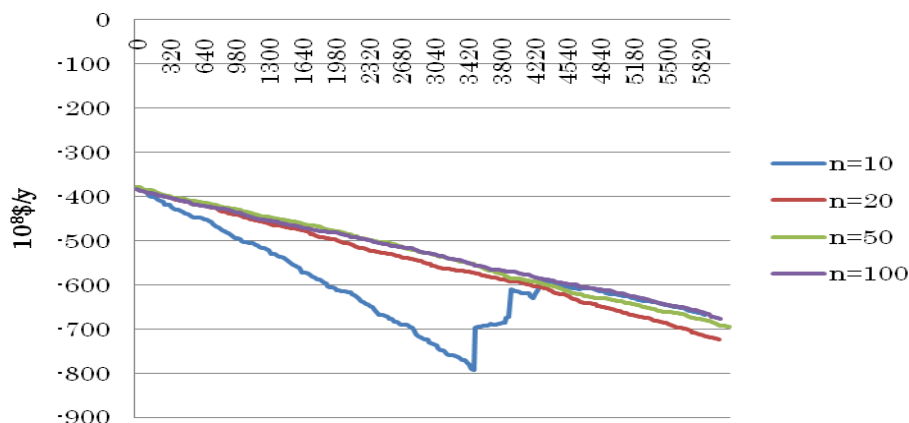


e : 国内の電力価格

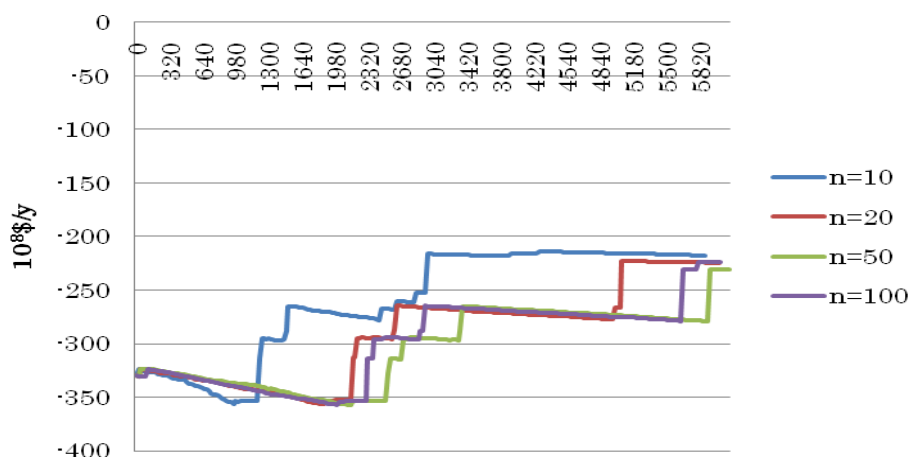
図 6-8 : 各資源の国内取引価格の遷移の様子

$n=10$ 人の場合と比べ、 $n=20$ 、 50 、 100 のケースでは価格の上昇が抑えられている。これは同業者の人数が増えたことで、市場が完全競争状態に近付き、価格も均衡価格に近付いていると考えられる。また $n=50$ のケースと $n=100$ のケースでは、取引価格にほとんど差が見られなかった。 $n=50$ 人の時点で完全競争状態になっているため、 n による影響がほとんどなくなっていると考えられる。

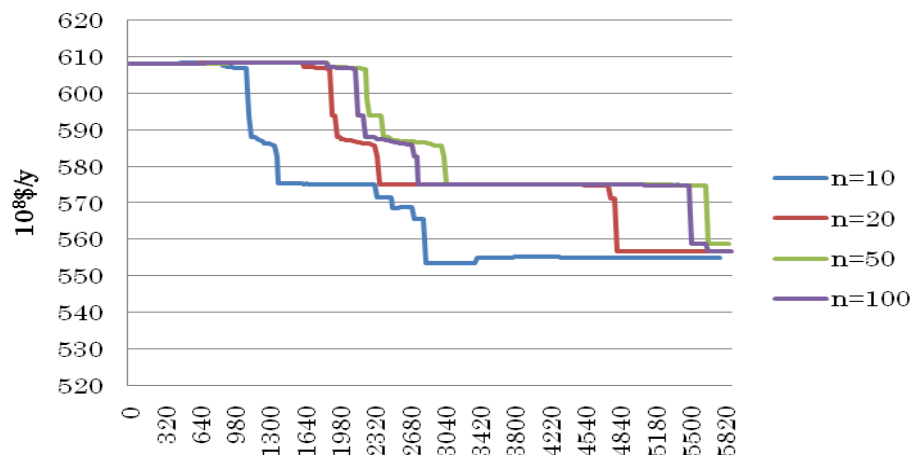
以下に $n=10$ 、 20 、 50 、 100 それぞれにおける国内のエージェントの報酬関数を示す。 $n=10$ に比べ $n=50$ 、 100 のケースでは、資源業者の競争の激化により電気事業者、消費者といった消費側の報酬関数が改善されている。そして供給側である石油業者や石炭業者の報酬が悪化している。これは競合によって消費者余剰が増大し、生産者余剰が減少したとも考えられる。また、報酬関数においても $n=50$ と 100 のケースでは結果が似てきており、両者において n による影響が小さいことを示している。



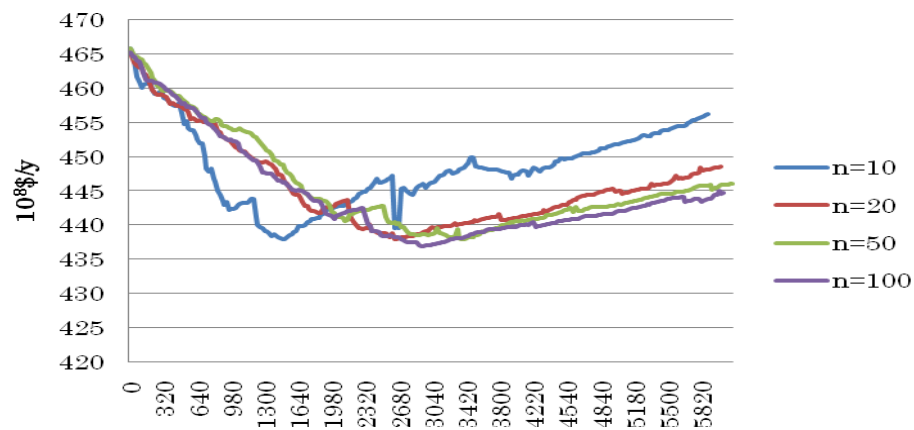
a : 石油業者



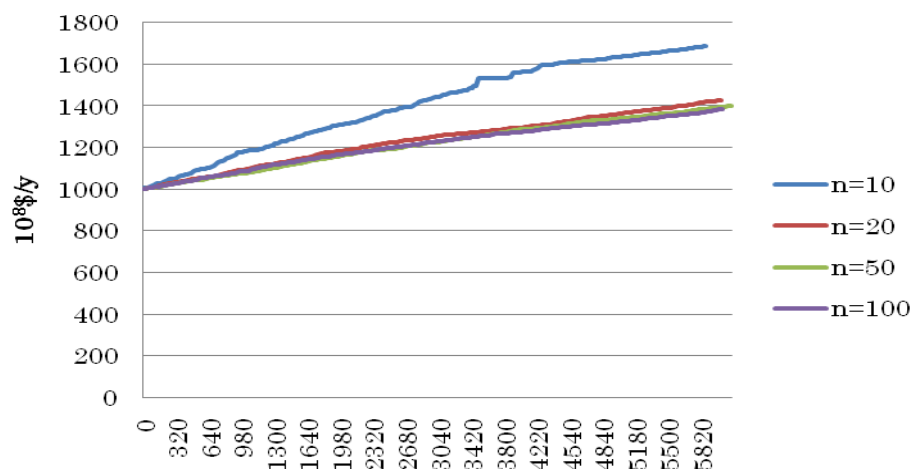
b : 天然ガス業者



c : 石炭業者



d : 電気事業者



e : 消費者

図 6-9 : 日本国内の各エージェントの報酬関数の n による違い

6-2. 世界の全てのエージェントが戦略をとるケース

本節では、世界の全てのエージェントが戦略をとった場合の石油、シミュレーション結果と、それに対する考察を論ずる。

6-2-1. パラメータ n による違い

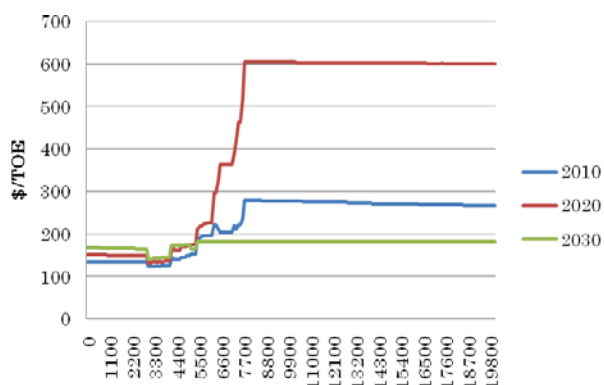
世界の全てのエージェントのみが戦略をとったケースの計算結果を示す。 $n=2$ 、 10 、 20 、 100 の3パターンで計算を行った。なお計算回数は20000回とした。各パラメータ値は以下のようにした。 q の値はより長期の計算と戦略をとるエージェントの種類が増えるため、日本のみのケースに比べ小さい値を採用した。

表 6-3：感度解析計算時の各パラメータ

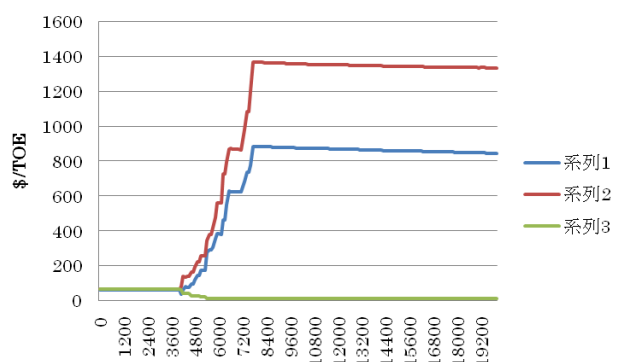
報酬関数の更新割合	α	0.5	[%]
行列 Q に入れる微小項	q	0.05	

$n=2$ のケース

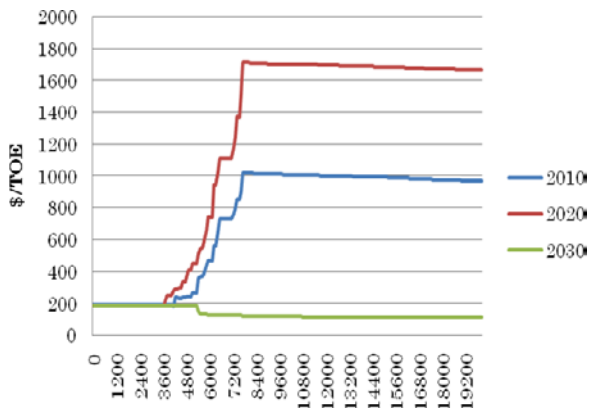
途中で価格が大きく発散し、その後収束へと向かっている。



a：原油の国際取引価格



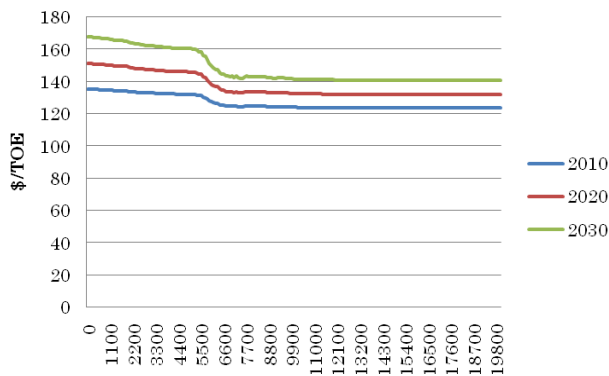
b：石炭の国際取引価格



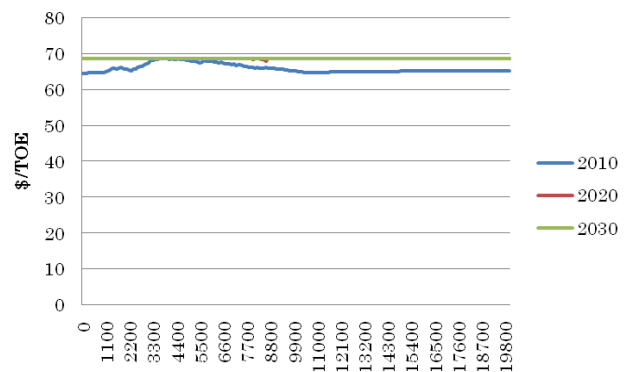
c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

n=10 のケース

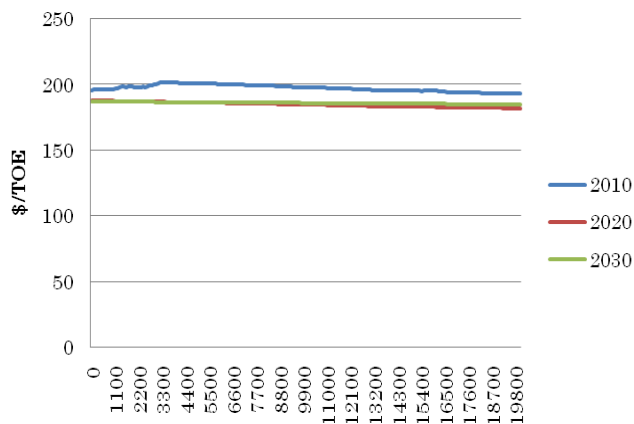
原油、天然ガスの価格は減少し収束へ向かっている。石炭の価格はあまり変化が見られない。



a : 原油の国際取引価格

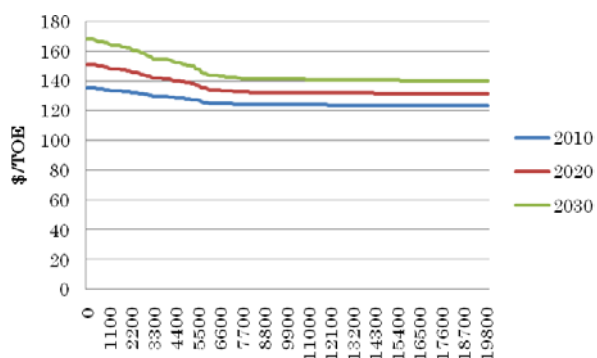


b : 石炭の国際取引価格

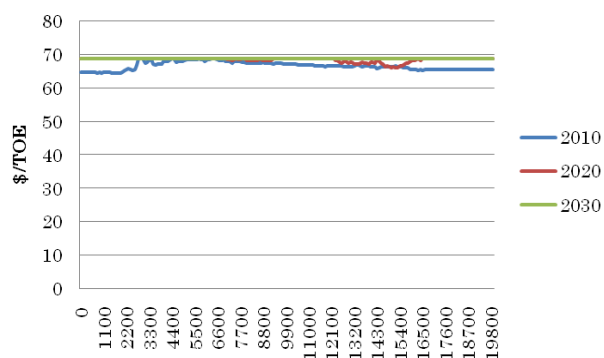


c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

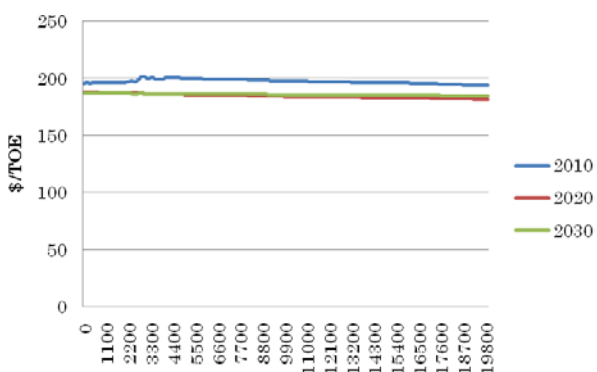
$n=20$ のケース



a : 原油の国際取引価格

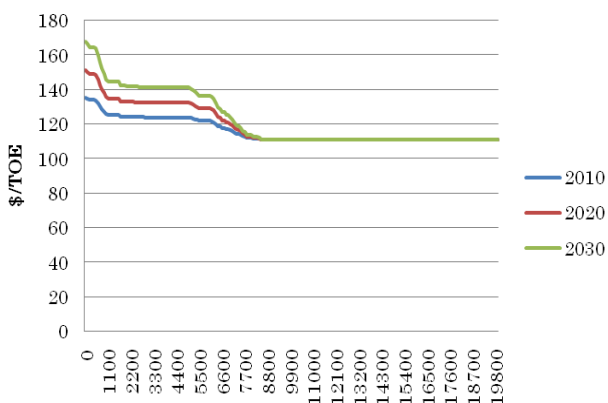


b : 石炭の国際取引価格

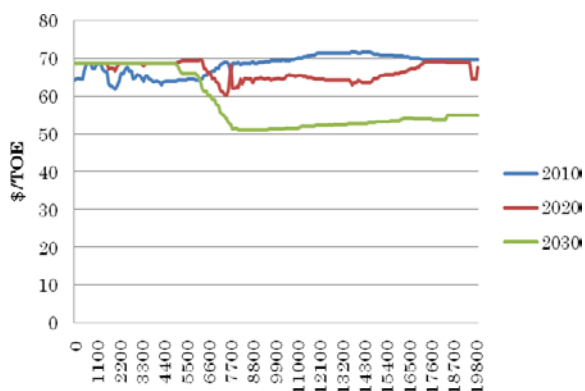


c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

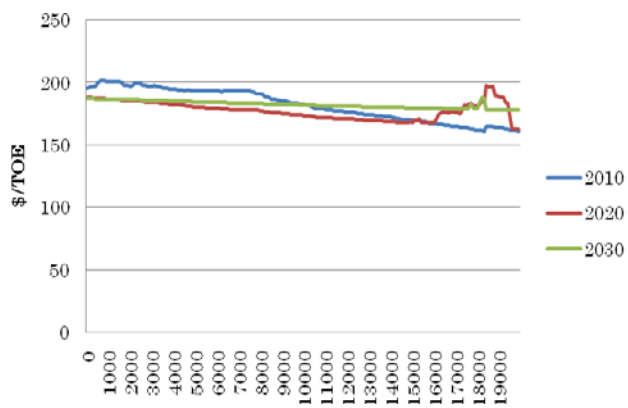
$n=100$ のケース



a : 原油の国際取引価格



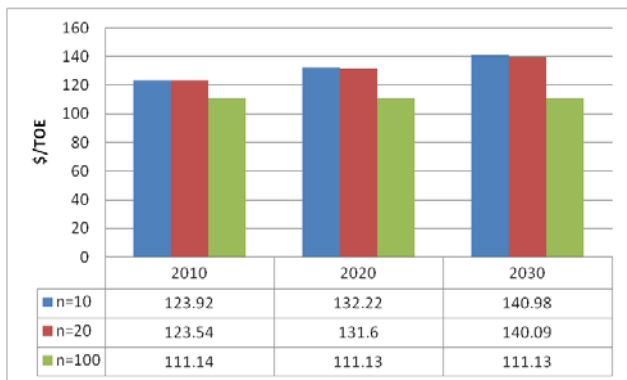
b : 石炭の国際取引価格



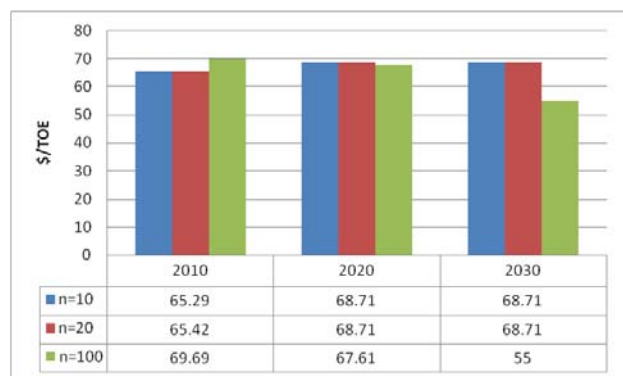
c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

図 6-10 : 石油、石炭の国際取引価格と天然ガスの日本の輸(出)入価格

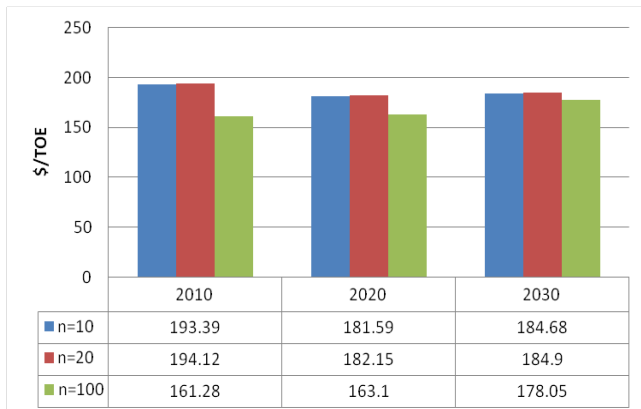
世界全体で戦略を取り合う場合、 $n=10$ 、 20 、 100 のケースにおいて国際市場で取引が行われる原油、石炭の国際取引価格が下がっている。これは輸出入を通して各 **Region** に存在する石油業者と石炭業者が供給側になったり、消費側になったりすることで、供給側だけでなく消費側の戦略もうまく反映されるためだと考えられる。また $n=2$ のケースでは、競合するエージェントが少ないため独占市場に近い寡占市場が形成され、取引価格が高騰しその後高値で収束していると考えられる。



a : 原油の国際取引価格の収束値



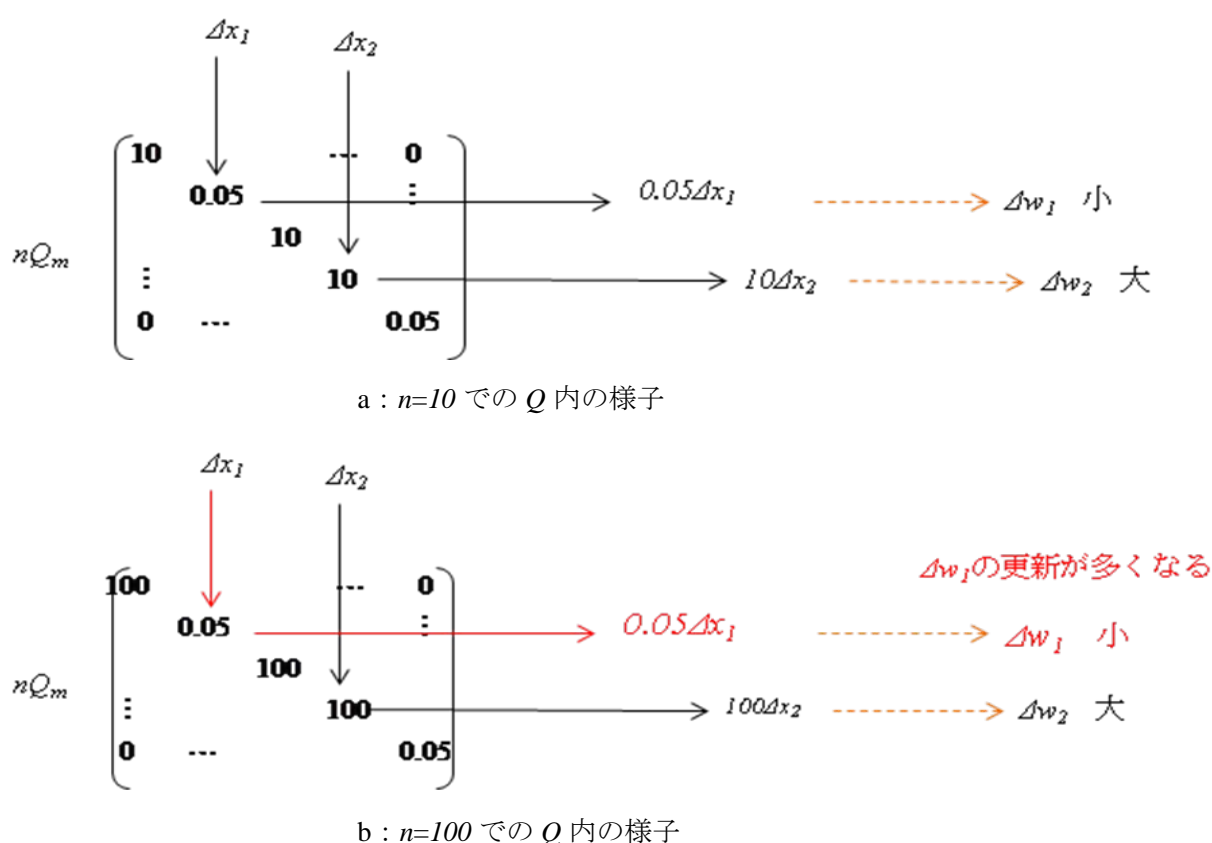
b : 石炭の国際取引価格の収束値



c : 天然ガスの日本の輸（出）入価格の収束値

図 6-11 : 各資源取引価格の収束値の比較

$n=10$ 、 20 、 100 のケースにおける各資源の価格の推移を比べると軒並み $n=100$ のケースの方が低い価格となっている。本来なら同業者の人数が増えることで完全競争市場へ近づくため、各資源の市場取引価格も社会厚生が最大である戦略更新なしの状態、つまり 0 回目の価格に近くなるはずである。そうならなかった原因は、5 章で述べたように、本研究では感度解析による最適化問題を解く際に、二次係数行列 Q の対角成分で 0 となっている箇所に微小定数 q を入れることで疑似的に問題を解いている。しかしこの微小定数項は n 倍されないため、 n の値が大きくなると Q 内に元からある値と微小定数項との値の差が大きくなってしまう。感度解析問題における最適化問題では戦略更新項 Δw の二乗和を最小とすることを目的としているため、 Q の成分がなるべく小さい項における x を更新しようとするのが想像できる (図 6-12)。 n の値が大きくなることで戦略更新が微小定数項 q の成分へと偏っていくことが考えられる。本来は 0 である q 成分の項への戦略が増えることで、理論的な挙動から大きくずれて行ってしまったと考えられる。



Q 内の値が大きい成分の変数 x を更新すると Δw の更新値もおおきくなることが予想される (図 5-4 参照)。ゆえに Q 内の値の差が大きくなると最適化問題の解として微小定数 q の成分への更新が多くなる。 q の値はもともと 0 であるためこの戦略更新を繰り返すことによって均衡解がずれてくると考えられる。

図 6-12 : 完全競争状態に近づかなかった原因の考察

$n=100$ のケースにおいて 2010 年の石炭価格のみが高くなっているのは、 $n=10$ 、20 のケースに比べて 2010 年の石炭需要が大きくなっているためと考えられる。石炭需要の増加は 2010 年時点で比較的発電容量のある東南アジア、ヨーロッパなどで、天然ガス火力が減少し石炭火力発電量が増大したためと考えられる。

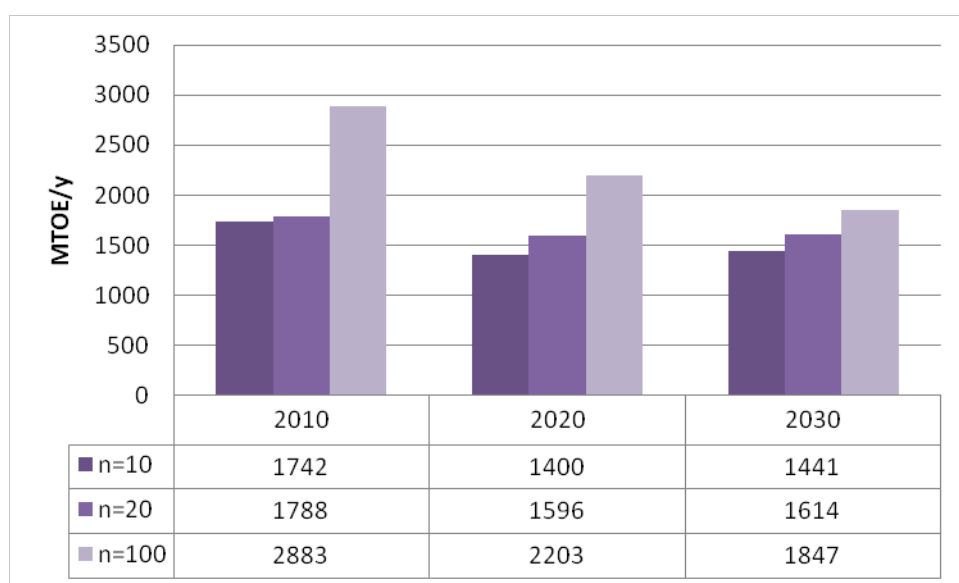


図 6-12：世界の総石炭供給量

また $n=100$ ケースの石炭需要の差が 2010、2020、2030 年と小さくなっているにつれ、石炭の国際取引価格も小さくなっていることがわかる。

6-2-2. 生産コストによる市場価格への影響

各エージェントの戦略行動によって資源の価格が収束していく様子をこれまでの章では述べた。各エージェントは自分の報酬関数が最大になるような戦略行動を繰り返し、その結果価格が決定する。本節では、石油、石炭、天然ガスの生産コストを変化させ、生産コストの変化が市場価格に与える影響を考察する。取引価格が「生産コスト＋余剰分」の和で定まると考えた時、競合による市場均衡点（価格）が存在するならば、各エージェントは取引価格をその市場均衡点に近づけようとする。もし生産コストが変化してもその分余剰分を変化させることで市場取引価格はあまり変化しなくなると考えられる。

生産コスト

計算に用いる生産コストは「通常×0.7」「通常」「通常×1.3」「通常×1.6」「通常×2」の5パターンとし、 n はすべて10人とする。その他の条件は6-1-1節と同じとし、計算回数は20000回とした。なお石油、石炭、天然ガスの生産コストはグレードごとに分かれており以下のようになっている。各資源ともグレードの若い方から生産していき、そのグレードの生産分を超えると次のグレードの資源を生産することになる。

表 6-3：石油、石炭、天然ガスの生産コスト

i：通常の実産コスト

\$/TOE	グレード1	グレード2	グレード3	グレード4	グレード5	グレード6	グレード7	グレード8
天然ガス	36.36	95.59	150.74	198.53	231.62	279.41	338.24	716.91
原油	44.12	113.97	161.76	220.59	268.38	330.88	419.12	816.18
石炭	44.71	59.41	74.12	88.82	103.53	129.26	177.06	250.59

ii：通常×0.7の実産コスト

\$/TOE	グレード1	グレード2	グレード3	グレード4	グレード5	グレード6	グレード7	グレード8
天然ガス	25.72	66.91	105.52	138.97	162.13	195.59	236.77	501.83
原油	30.88	79.78	113.23	154.41	187.87	231.61	293.38	571.33
石炭	31.30	41.58	51.88	62.17	72.47	90.48	123.94	175.41

iii：通常×1.3の実産コスト

\$/TOE	グレード1	グレード2	グレード3	グレード4	グレード5	グレード6	グレード7	グレード8
天然ガス	47.27	124.27	195.96	258.09	301.11	363.23	439.71	931.98
原油	57.36	148.16	210.29	286.77	348.89	430.14	544.86	1061.03
石炭	58.12	77.23	96.36	115.47	134.59	168.04	230.18	325.77

iv : 通常×1.6 の生産コスト

\$/TOE	グレード 1	グレード 2	グレード 3	グレード 4	グレード 5	グレード 6	グレード 7	グレード 8
天然ガス	58.81	152.94	241.18	317.65	370.59	447.06	541.18	1147.1
原油	70.59	182.35	258.81	352.94	429.41	529.41	670.59	1305.8
石炭	71.53	95.06	118.59	142.11	165.65	206.82	283.30	400.94

v : 通常×2 の生産コスト

\$/TOE	グレード 1	グレード 2	グレード 3	グレード 4	グレード 5	グレード 6	グレード 7	グレード 8
天然ガス	73.52	191.20	301.48	397.06	463.24	558.82	676.48	1433.3
原油	88.24	227.94	323.52	441.18	536.76	661.76	838.24	1632.4
石炭	89.42	118.82	148.24	177.64	207.06	258.52	354.12	501.18

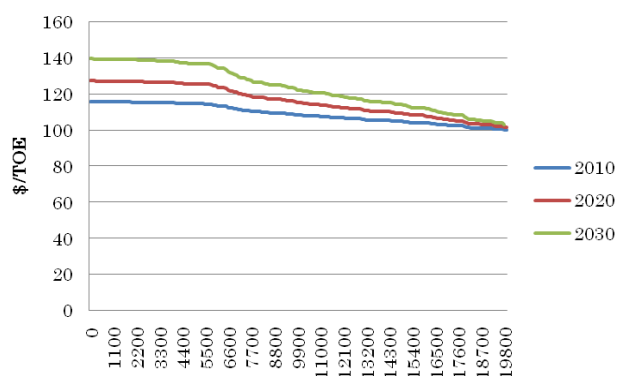
※なお感度解析計算時における各パラメータ値

以下に各生産コストにおける資源の取引価格を示す。

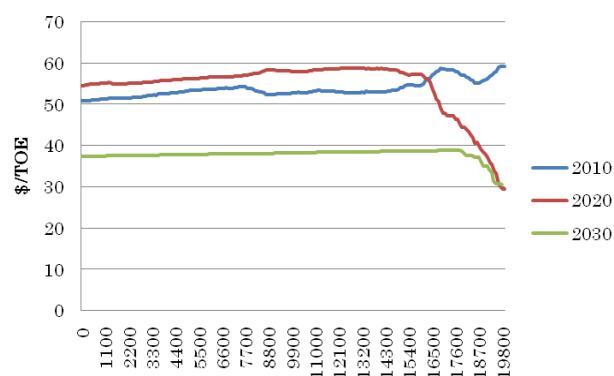
i : 通常の実産コストのケース

通常の実産コストによる結果は 6-2-1 節の $n=10$ の結果参照。

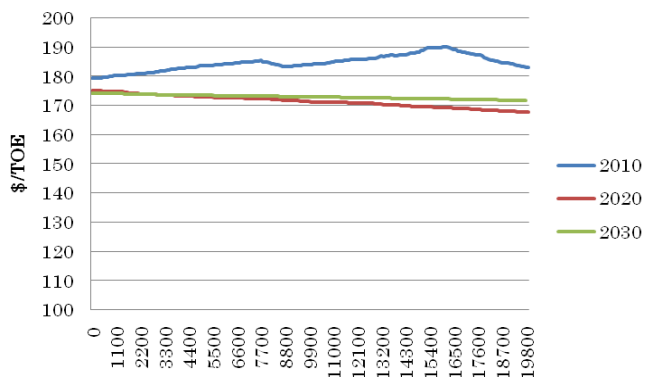
ii : 通常の実産コスト×0.7 のケース



a : 原油の国際取引価格

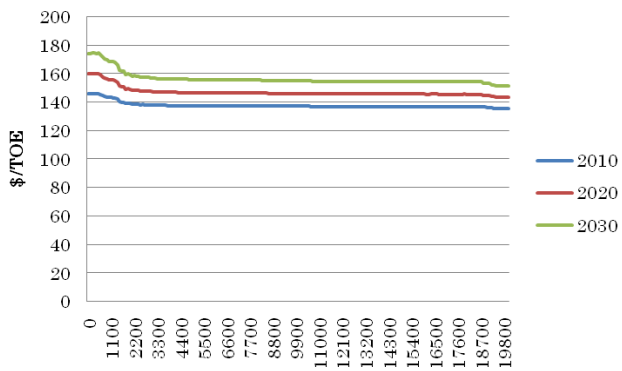


b : 石炭の国際取引価格

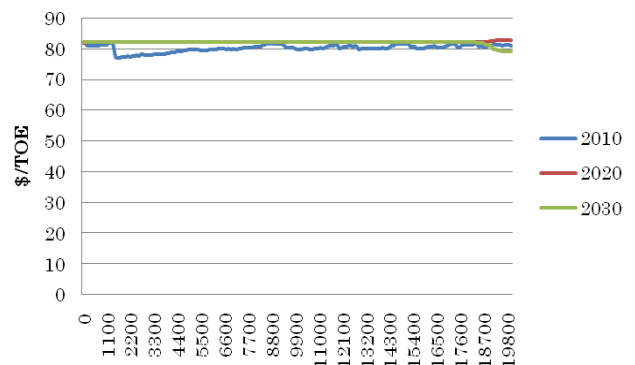


c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

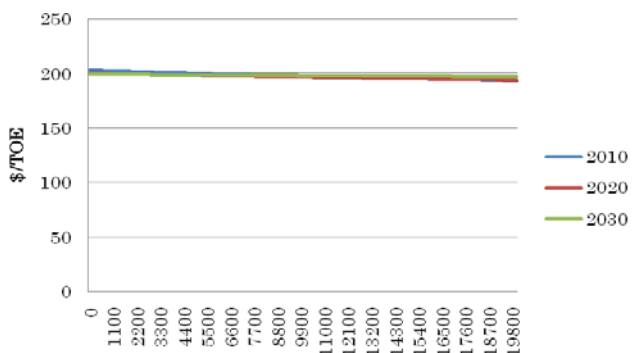
iii : 通常の生産コスト×1.3 のケース



a : 原油の国際取引価格

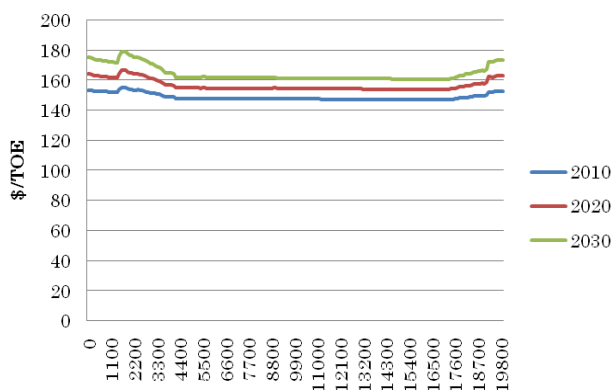


b : 石炭の国際取引価格

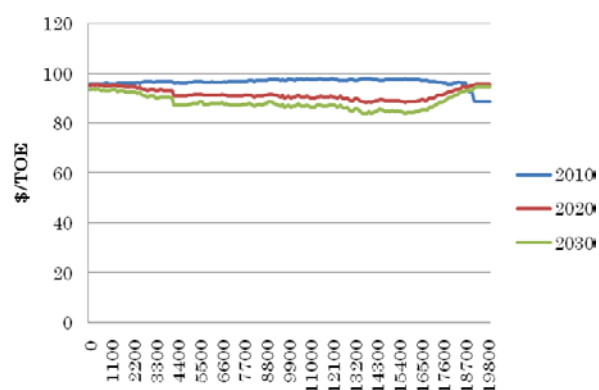


c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

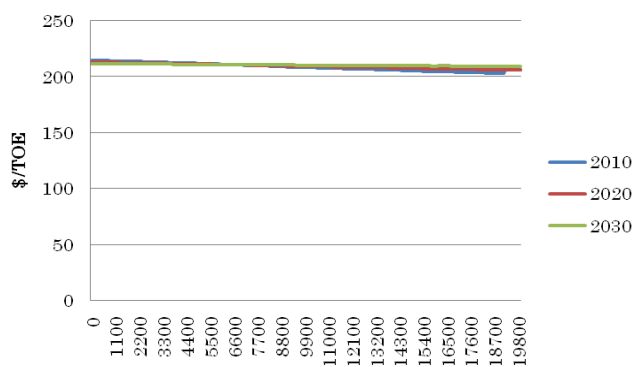
iv : 通常の生産コスト×1.6 のケース



a : 原油の国際取引価格

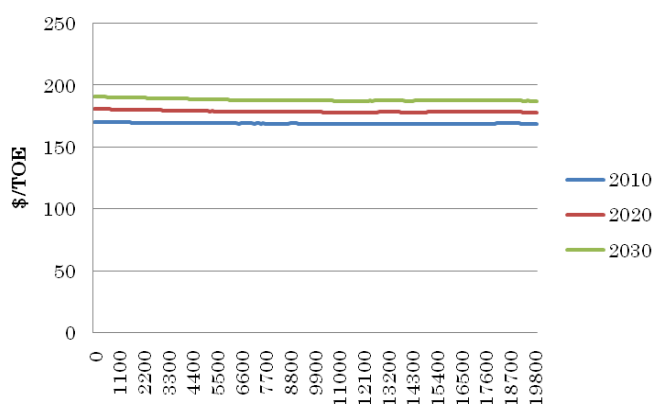


b : 石炭の国際取引価格

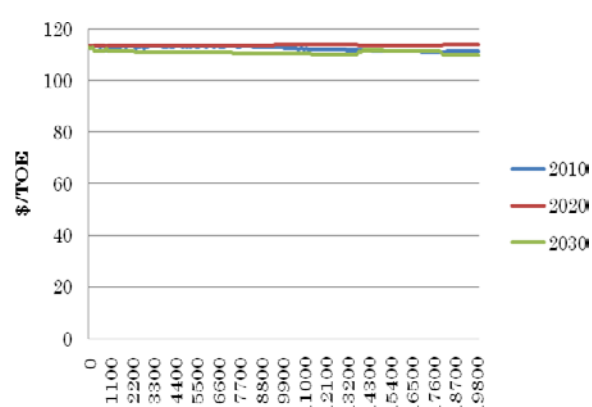


c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

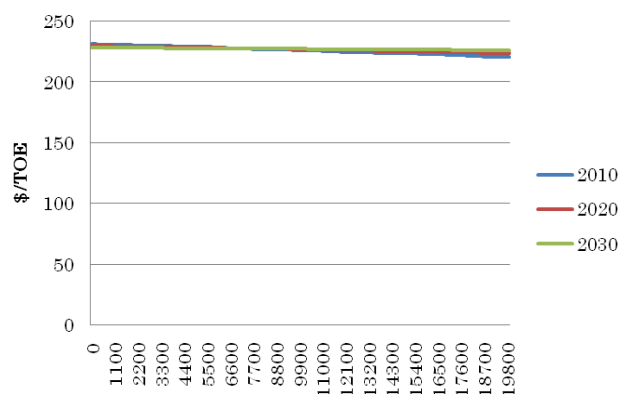
iv : 通常の生産コスト×2 のケース



a : 原油の国際取引価格



b : 石炭の国際取引価格



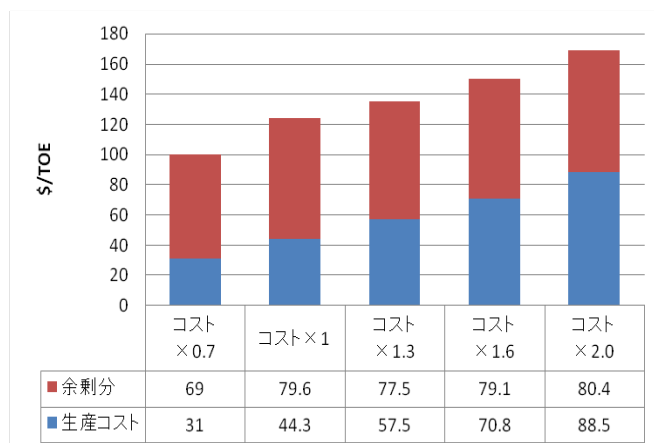
c : 天然ガスの日本の輸(出)入価格

図 6-14 : 各コスト値における石油、石炭、天然ガスの取引価格

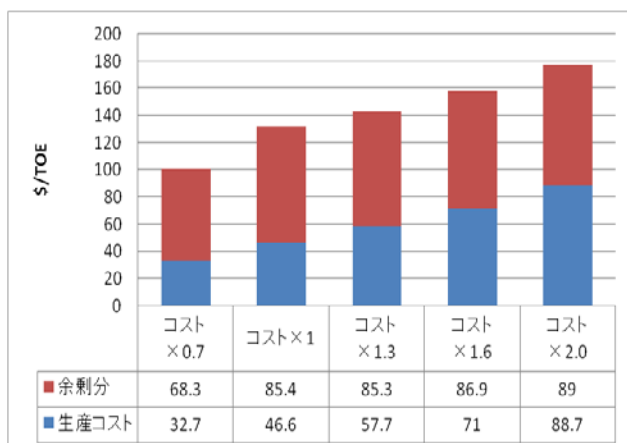
各生産コスト条件において、取引価格が収束しているのを見て取れる。各資源とも緩やかにだが、価格が下がっていつている。コストが 0.7 倍の時のみ価格の変動幅が大きい。これは生産コストが小さい分、市場取引価格における余剰コストの取り幅が大きいため、様々な戦略行為が行われているためと考えられる。

以下にその収束価格と生産コストを時点ごとに比較したグラフを示す。

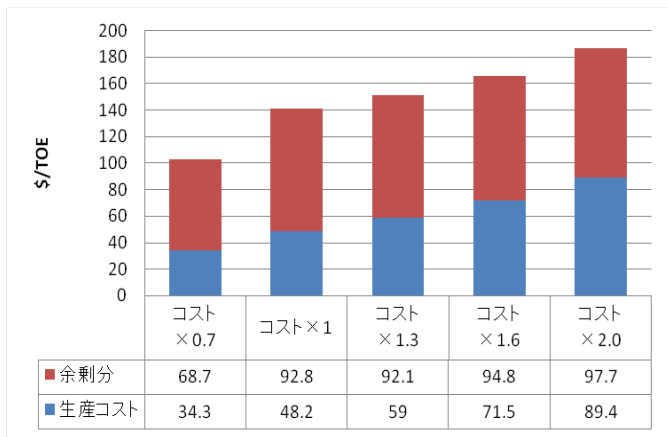
※以下のグラフにおける生産コスト値は、全世界での各資源のグレードごとの消費量と、前述のグレード別コストを用いて導いた全世界での平均生産コスト値であり、厳密には生産コストは地域ごとに異なってくる。



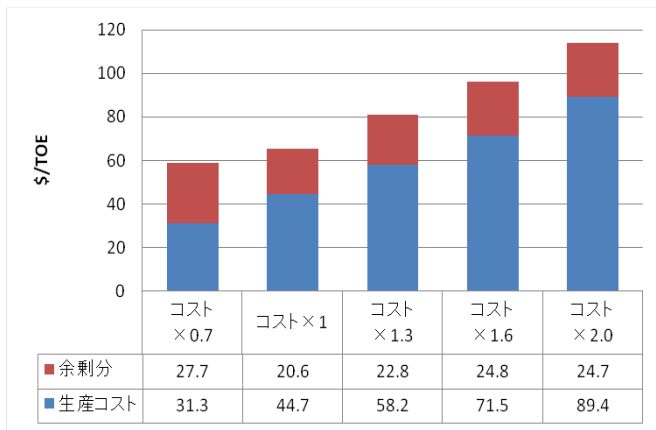
a : 2010 年時の原油国際取引価格



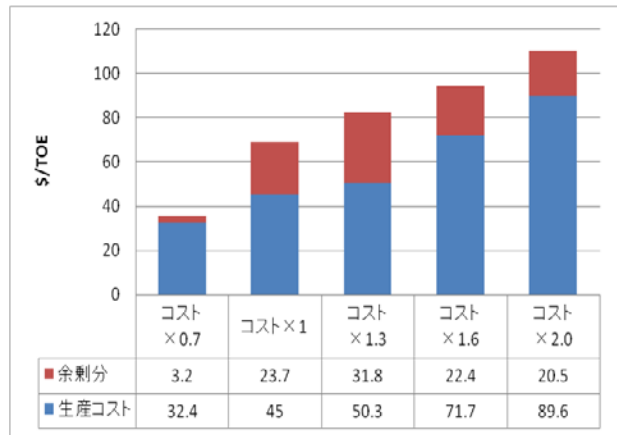
b : 2020 年時の原油国際取引価格



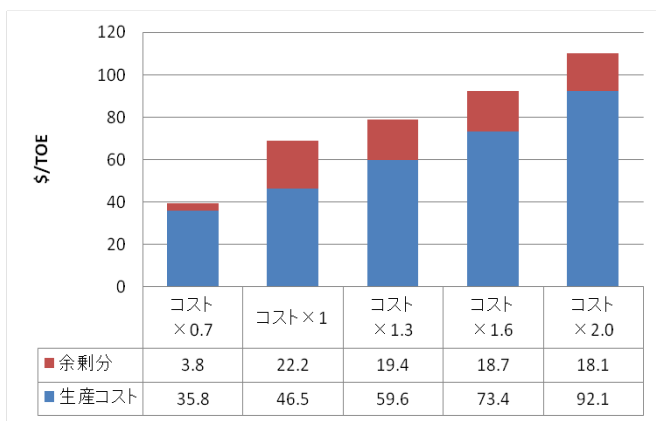
c : 2030 年時の原油国際取引価格



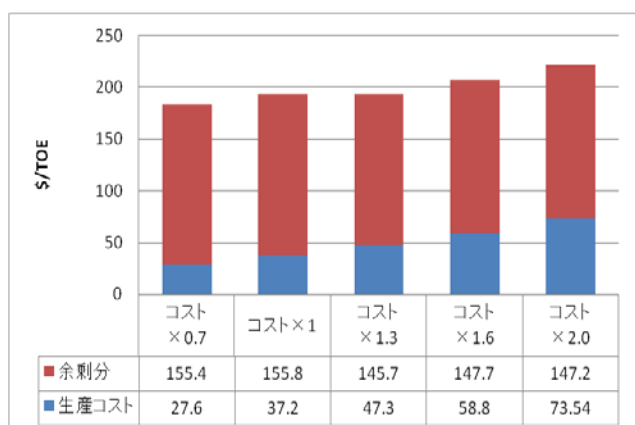
a : 2010 年時の石炭国際取引価格



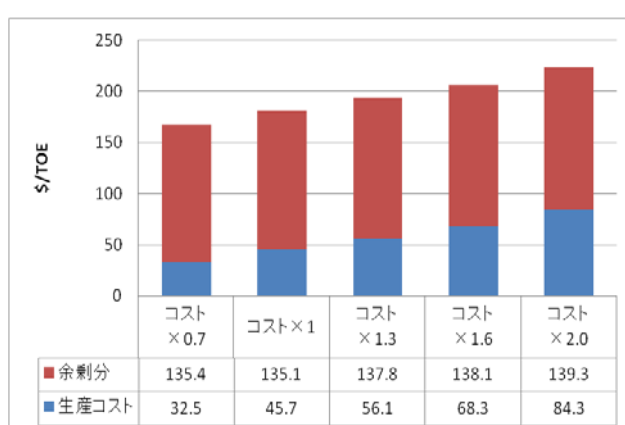
b : 2020 年時の石炭国際取引価格



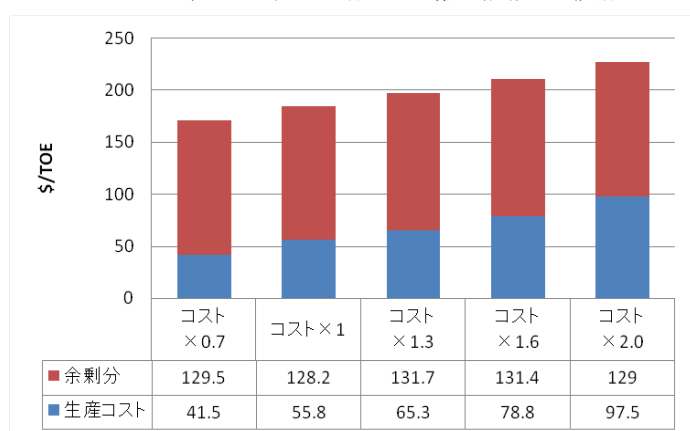
c : 2030 年時の石炭国際取引価格



a : 2010 年の日本の天然ガス輸（出）入価格



b : 2020 年の日本の天然ガス輸（出）入価格



c : 2030 年の日本の天然ガス輸（出）入価格

図 6-15 : 各時点の生産コスト差における収束価格の比較
(生産コスト+余剰分がその資源の取引価格を表す)

各資源とも生産コストの上昇につれて取引価格も上昇しており、競合によって生産コスト差が埋まることはなかった。まず石油と天然ガスについて考えると石油と競合関係（主に液体燃料）にあるメタノール、天然ガスと競合関係（主に気体燃料）にある水素の価格がそれぞれ石油、天然ガス価格に比べ十分高いため、消費側が化石燃料を買い控え、代替エネルギーへエネルギー変換することがあまり行われなかったためであると考えられる。しかしコストが1倍から増加したケースにおいて、各エージェントが定める余剰分（上乗せ額）はほぼ一定値に収束しているのが見て取れる。これは売り手側（同業者）による競合によりこの余剰価格が定まることを意味していると考えられる。

また石炭においては、生産コストが高くなるにつれて余剰価格が小さくなっているが、これは競合関係（主に固形燃料）にあるバイオマスとの価格差が小さいため、石炭の生産コストを上げすぎるとバイオマスへのエネルギー転換が行われることで市場価格の上昇が抑えられるので、それに近づけるために余剰価格が減少していると考えられる。

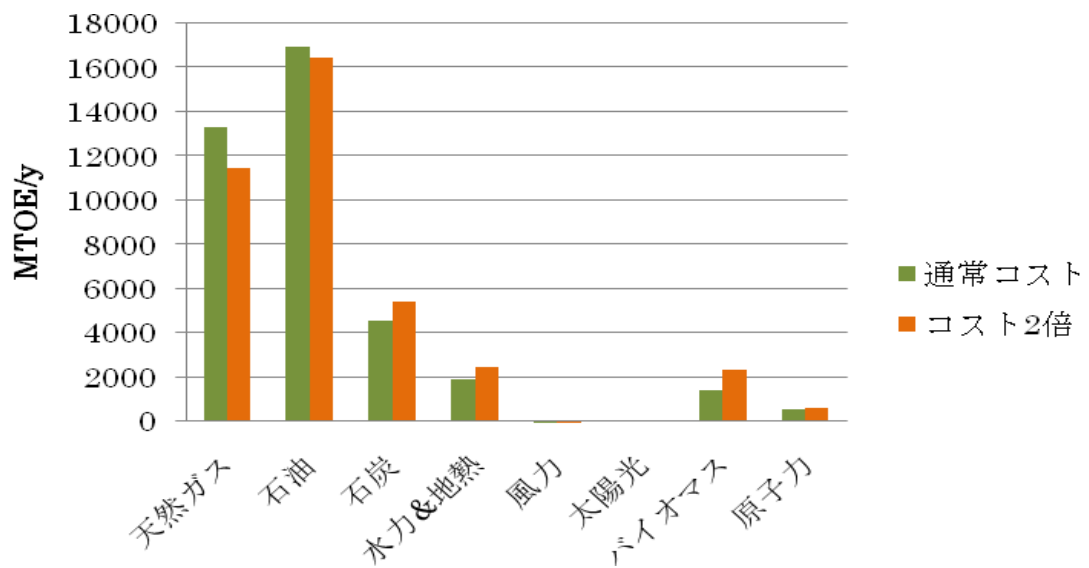


図 6-16：世界の総エネルギー生産量

前述のように化石燃料の生産コストを2倍にしても、天然ガス、石油の代替エネルギーと考えられる水素、メタノール（エタノール）へのエネルギー転換は行われていない。生産コストを2倍にしてもまだ、化石燃料の市場価格のほうが低く、また2010、2020、2030年の短期間においてはCO₂制約もさほど厳しくないため、代替エネルギーへの転換の意味がほとんどないということを意味している。

さらに化石燃料の生産コストを上げたり、CO₂制約が強く効いてくるような長期間を考えることで、代替エネルギーの相対的な価値が上がり、エネルギー転換とそれに伴う異業種間の競合の激化が予想される。

表 6-4：各資源の地域内取引平均価格

※2010、2020、2030 年の 3 時点における各地域内の取引価格の平均値

a：通常コストのケース（\$/TOE）

Region	水素	天然ガス	石油	メタノール	石炭	バイオマス
1	202	202	218	392	93	55
2	128	80	132	337	51	32
3	201	188	125	337	56	108
4	187	60	121	331	51	30
5	190	130	126	330	64	74
6	290	124	129	332	63	74
7	172	53	116	331	62	65
8	167	75	120	330	51	36
9	164	66	116	331	61	30
10	212	46	116	331	52	30

b：コスト×2 のケース(\$/TOE)

Region	水素	天然ガス	石油	メタノール	石炭	バイオマス
1	298	246	256	476	141	91
2	273	130	184	444	98	44
3	270	226	181	457	107	134
4	259	94	177	445	98	31
5	254	199	188	443	122	128
6	278	185	184	451	117	100
7	198	84	171	444	113	80
8	226	103	176	444	98	51
9	275	83	171	445	99	30
10	241	83	143	444	98	30

生産コスト 2 倍のケースにおいても、水素と天然ガス、石油とメタノールの価格差は大きく消費側が天然ガス、石油を使用し続けることがうかがえる。一方石炭は競合するバイオマスとの価格差が小さくなり（価格が上回り）、エネルギー転換が起きることで、余剰コストを小さくしてそれに対応しようとしている。競合する両資源の価格差がある程度小さくなるまでは、市場価格における余剰コストは同業者による競合によって決まるが、競合する資源との価格差が小さくなり消費側の買い控えが出てくると、余剰コストを小さくして競合価格に近づくと考えられる。

最後に生産コストを 5 倍にした時の石炭の国際取引価格を示す。

生産コスト 2 倍における石炭の例によれば競合する代替エネルギーとの価格差が小さくなれば余剰コストは同業者による競合による価格よりも小さくなると思われる。生産コストを 5 倍にすることでさらにバイオマスとの価格差が小さい時の価格決定を考察する。

以下に生産コスト 5 倍での石炭の国際取引価格の収束値を示す。(計算回数は 15000 回)

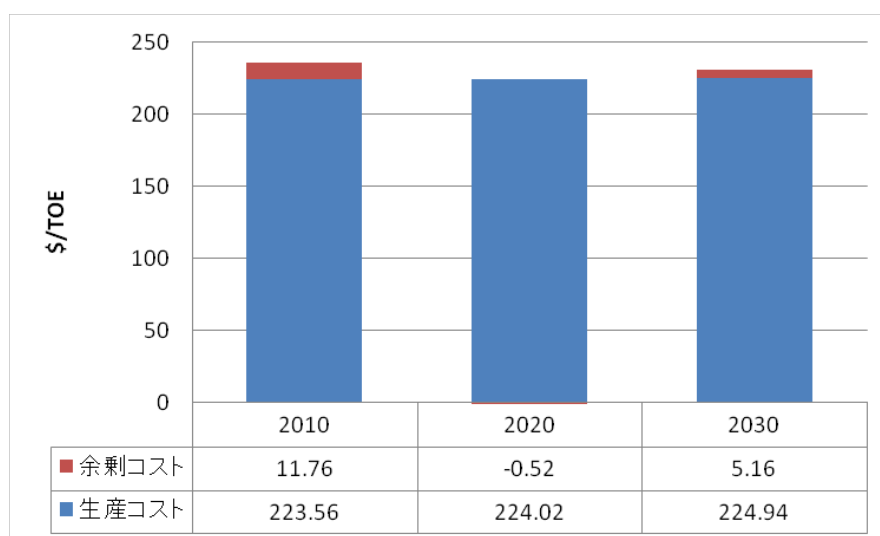


図 6-17：生産コスト 5 倍時の石炭の国際取引価格

これまでのコスト 2 倍までのシミュレーション結果と比べて、生産者側の利得となる余剰コストが大幅に減っているのが見て取れる。これは生産コストの上昇によって石炭の価格が高騰した結果バイオマスへのエネルギー転換が大きくなり、さらに地域内での価格もバイオマスより高くなっているため、余剰コストを減らして石炭の価格を下げようとしているものと考えられる。前項で述べた、消費者の買い控えによって余剰コストが小さくなり競合価格に近づくという予想にあった結果となった。

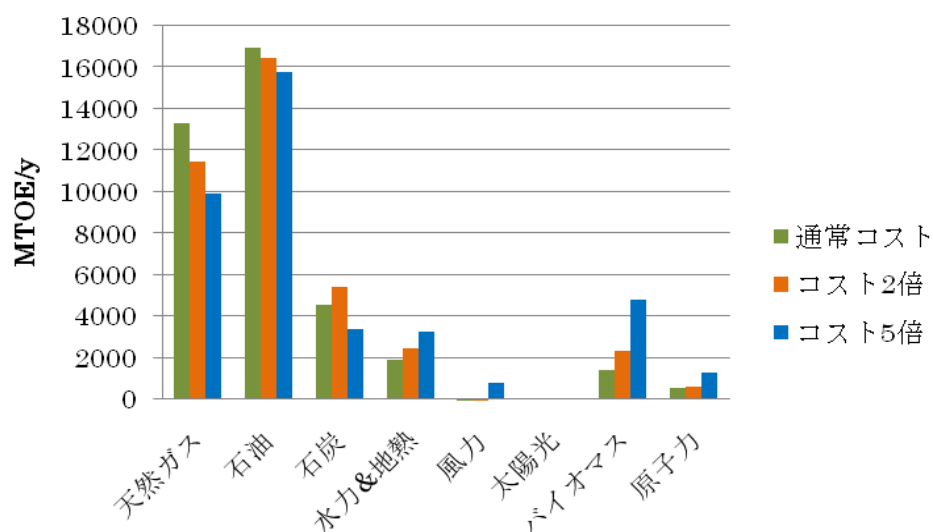


図 6-18：世界の総エネルギー生産量

実際に石炭の生産量が減り、バイオマスの生産量が大幅に増えているのが見て取れる。なお石油、天然ガスについてはそれぞれメタノール、水素への転換は見られなかった。

表 6-5：各資源の地域内取引平均価格

※2010、2020、2030 年の 3 時点における各地域内の取引価格の平均値

Region	水素	天然ガス	石油	メタノール	石炭	バイオマス
1	396	385	333	503	257	184
2	274	247	293	475	215	125
3	370	351	292	482	228	219
4	249	201	287	463	215	98
5	363	326	291	475	229	178
6	368	309	301	482	230	183
7	295	193	281	476	230	127
8	257	193	285	469	216	106
9	258	198	281	468	227	100
10	218	194	281	462	216	81

石炭とバイオマスの価格が逆転しているのが見て取れる。代替エネルギーとの競合により石炭価格はほぼ原価となってしまっている。

第7章 結論

7-1. まとめ

本研究では、ゲーム理論に基づく市場モデルを世界モデルに応用し、事業者単位の世界マルチエージェントモデルの構築を行った。モデル内における戦略探索時に、各エージェントが自分にとっての最適戦略を解析的に得られ効率的に戦略決定をすることができるよう、感度解析を用いた戦略更新法を組み込んだ。さらに、感度解析計算時に同業者の人数を表すパラメータ n を導入し、擬似的に市場における n 人の同業者による競合を表現できるモデルへの書き換えを行った。

以下に本研究で得られた成果をしるす。

モデルの開発と妥当性の評価

本研究で目指した、事業者単位のエージェントが互いに競合しあうことを想定したマルチエージェント型世界モデルの開発をした。さらにパラメータ感度解析にパラメータ n を組み込むことで同業者による競合を擬似的に表現した。パラメータ n の値が増加するにつれて、各資源の取引価格の収束値が減少し、同業者の人数によって市場が独占市場→寡占市場→完全競争市場と変化する様子を本モデルが表現できていることを示した。

均衡価格決定の要因に対する知見

最後に石油、石炭、天然ガスの生産コストを変化させたシミュレーション結果において、収束した各資源の価格を「生産コスト+余剰分」と分けて分析することで、化石燃料の均衡価格決定の要因を探った。結果は化石燃料の価格に比べ、競合する代替エネルギーの価格が十分高い場合は消費側のエネルギー転換は起こらず、生産コストの上昇分価格が上がっても消費者が買い続けることで、化石燃料の価格は上がり続けた。しかし供給側の利益となる余剰価格分に関しては、生産コストが上がってもほぼ一定値に収束し、余剰価格分は同業者との競合によって生産コストによらずほぼ一定値に収束することがわかった。

7-2. 今後の課題

本研究を通して得られた今後の課題点を挙げる。

モデルの書き換え

本研究ではパラメータ n を用いた感度解析問題において、二次行列 Q の対角成分に微小定数項をいれることで最適化計算を行ったが、これにより擬似的な最適更新解が得られることで、理論的には戦略更新ができないナッシュ均衡状態においても戦略更新がなされてしまう可能性がある。このため本来なら収束するはずの価格が収束しなくなるということも考えられる。このような状態を避けるため、解法を工夫し微小定数項に頼らずに厳密な解が得られるようにする必要がある。その方法の一つとして、二次係数行列 Q に有限値を持つ成分と、その成分と同じ制約式に含まれる成分に対してのみ戦略更新成分をとる方法が考えられる。

エージェントごとに異なるパラメータ n

本研究では全てのエージェントに対して、同業者の人数として共通の値 n を用いたが実際には地域、エージェントの種類によって同業者の人数が異なってくると考えることもできる。例えばロシアにおける天然ガス事業は、国営の企業^[11]がほぼ独占状態にある。また東南アジアなどでは国営の電気事業者のみをもつ国々も多い。地域、事業種ごとに異なる n を与えることで、こういった独占市場状態と競争市場状態が入り混じった世界におけるシミュレーションが可能になると考えられる。またエージェントに対して消費者の人数を多くすることで、消費者側の戦略行動による影響がより強く反映される世界をシミュレーションできるようになると考えられる。

長期モデルによる試行

本研究では主に短期モデルにおける各種資源価格の推移とそれに関する考察を示したが、時点が 2030 年までであり CO_2 制約等もあり効いてこない状況での結果となった。より長期モデルでシミュレーションを行うことで、 CO_2 制約における各資源価格の影響、クリーンエネルギー業者の戦略、 CO_2 取引における戦略価格などに対する知見が得られるようになると思われる。

謝辞

最後に、研究室生活ならびに本研究の実施にあたり、ご指導・ご鞭撻を賜りました皆様に對しまして、この場を借りて謝礼を申し上げたいと思います。

藤井康正教授には、修士論文の研究テーマの設定から、研究手法、研究の進め方に至るまで細部に渡ってご指導を請け賜りました。思うように研究が進まない時も辛抱強く私の研究の動向を見守って頂き、全体ミーティングや個別ミーティングなどを通して、研究の適切な軌道修正や研究手法の改善案などを示して頂きました。問題の定式化の際には、私が理解できるまで何時間もかけ指導して頂きました。そして私の研究の進捗状況に応じてその都度叱咤激励をして頂きました。

また、私生活面においても社会人としての心構えなど貴重なアドバイスを頂きました。飲み会や雑談の際などには、藤井先生の幅広い興味に培われたお話を聞かせていただきとても楽しむのと同時に興味の広さ、知識の多さに感心させられました。

藤井康正教授には公私両面で大変お世話になったのと同時に、自分の注意不足によって多大なご迷惑をおかけいたしました。ここに心より御礼申し上げるとともに謝礼を申し上げます。

林武人さんには、いつも研究室に差し入れを持ってきてくださったり、パソコンの調子が悪い時などに見ていただいたりして頂き、快適な研究室生活を送ることができました。心より御礼申し上げます。

同輩の細川智弘君、向山峻介君には私の研究に対する客観的なアドバイスを頂きました。また研究室生活では、研究する中でも、時に羽目をはずし楽しむことができました。また二人には公私両面でいろいろ相談に乗ってもらいその都度貴重な意見を頂きました。二人に会えた幸運と共に心より御礼申し上げます。

すでに卒業された研究室の緒先輩方及び大学院生、卒論生の方々とは、二年間の研究生活を通じて、時には真剣に相談に乗って頂き、時にはリラックスして気軽に話し、そして時には大いに羽目をはずして遊ぶことができ、とても有意義な二年間を過ごすことができました。心より御礼申し上げます。

最後に、長い学生生活を経済面、精神面で支え、私の身勝手な行動に対しても暖かく応援してくれた家族に心より感謝し、謝辞といたします。

2009年2月 笠松隼樹

参考文献

- [1] 財団法人地球環境産業技術研究機構(RITE)ホームページ
<http://www.rite.or.jp/Japanese/lab/sysken/systemken.html>
- [2] 篠原剛 「エネルギー戦略の国際競合関係考慮のためのエージェントベース世界エネルギーモデルの構築」 東京大学 2004 年度 修士論文
- [3] 藤井康正 「マルチエージェントシミュレーションに基づく地球温暖化対策における国際協調に関する考察」, 第 24 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 13-6, 東京, (2008)
- [4] 梶井厚志 松井彰彦 「ミクロ経済学 戦略的アプローチ」 2000 年 日本評論社
- [5] 生天目 章 「マルチエージェントと複雑系」 1998 年 森北出版株式会社
- [6] 「電力中央研究所研究調査資料」 1996 年 電力中央研究所
- [7] 奈良宏一 佐藤泰司 「システム工学の数理手法」 1996 年 コロナ社
- [8] 茨木俊秀 福島雅夫 「最適化の手法」 1993 年 共立出版株式会社
- [9] 下村貴裕 「マルチエージェントモデルを用いた電力市場における価格形成過程の分析」
東京大学 2002 年度 修士論文
- [10] 京都議定書の概要ホームページ
<http://www.env.go.jp/earth/cop6/3-2.html>
- [11] ロシア国営天然ガス企業ガスプロム ホームページ
<http://www.gazprom.com/>

発表実績

- 1) 「世界エネルギーモデルにおけるCO₂排出量 50%削減の可能性と地球環境への影響」
平成 20 年電気学会全国大会（2008 年 3 月）
- 2) 「複数の同業者の存在を考慮したエネルギー事業者単位のマルチエージェント型世界エネルギーモデルの開発」
平成 21 年電気学会全国大会（2009 年 3 月予定）