

SFC ディスカッションペーパー  
SFC-DP 2015-004

## 原油・天然ガス市場のモデル分析

小坂弘行（総合政策学部名誉教授）

[hkosaka@sfc.keio.ac.jp](mailto:hkosaka@sfc.keio.ac.jp)

2015 年 10 月

## 原油・天然ガス市場のモデル分析

小坂弘行  
総合政策学部名誉教授

〒252-8520 藤沢市遠藤 5322

### 要約

70年代の2度のオイルショックは、従来の原油価格をそれぞれ4倍に引き上げ、世界経済に多大な影響を与えた。これを契機に一次産品市場のモデル化が進展した。

日本は東関東大震災以来、原子力発電からの撤退を余儀なくされ、いまだ定まらぬエネルギー政策のあおりを受けて、当面の天然ガスの輸入が急増し、貿易赤字を積み重ねている。また一方、昨年2014年央のロシアのクリミア併合やウクライナ東部の一部の武力行使に端を発するウクライナとロシアの対立は、ロシア対西欧の対立構図となり、西欧の対ロシア経済制裁から原油価格が急落し、ルーブルが50%も減価している。

そうした最近の背景を受けて、本稿の目的は、関心が高まっている原油と天然ガスの国際市場の計量経済モデルを構築することにある。そこから両市場の価格と国内経済とのリンクを通して相互依存の様子を実証分析する。

## 1. はじめに

70年代、2度のオイルショックを経験した世界は、1982年ニューヨークに WTI 原油先物を導入し、政治的事件による乱高下は避けるような装置をつくった。しかしヘッジファンドによる投機取引は活発に行われている。原油取引は、北米、欧州、アジアの地域ごとに3大市場が形成され、それぞれの地域の需給を反映した独自の価格形成がされている。また近年、天然ガスも活発に採掘され、特に二酸化炭素の排出が少ないことから石油に代わるエネルギー源として定着している。これに関して、シェールガスは頁岩（シェール）層から採取される天然ガスをいい、従来のガス田ではない場所から生産されることから注目されている<sup>1</sup>。米国では1990年代から新しい天然ガス資源として重視され、2020年までに北米の天然ガス生産量のおよそ半分はシェールガスになると予想するむきもある。米国以外でも、カナダ、ヨーロッパ、アジア、オーストラリアの潜在的シェールガス資源も注目されている。

本稿は、通常マクロモデルをはじめとする各国の各種モデルにおいて外生変数の扱いを受けている原油や天然ガス取引、特にそれらの価格形成を内生化することを意図している。

## 2. 先行モデル

本節で先行するモデルを簡略に述べることにしよう。

### a) 伝統的モデルーCowles 流モデルー

70年代の2度にわたるオイルショックを背景に、70年代と80年代前半にかけて、伝統的な Cowles 流モデルが多く作成された。佐和隆光・荒井泰男(1980)の参考文献に、70年代に作成された文献が包括的に、シミュレーションモデルと最適化モデルに区分されてサーベイされている。熊倉修(1983)は、上を受けて供給国と需要国のマクロモデルを作成しながら、それらを均衡されることで、原油価格を内生化している。しかし需給モデルを構成する方向性は是とするが、推定された需給の双方モデルを均衡化して原油価格を求めるのは解が不安定化する可能性が高い。実際、分析でも不安定解となっている。熊倉修(1990)はさらに発展させたもので、石油市場と石炭市場を取り上げている。やはり両市場の需給均衡は方程式推定後に行っている。むしろ理論段階で均衡化させて、そこから原油価格を理論的に求め、それを実証する方がよい結果を導く。本稿でもその方向でモデル化を行っている。

さて70年代に登場したモデルの中でピンダイク・モデルの果たした役割は大きく、ここで

---

<sup>1</sup> シェールガス開発にはリスクが伴う。取り出す水圧破碎法により、水質汚染、大気汚染、地震誘発リスクがあると言われる。最も深刻なのは水質汚染。フランスは2011年に「水圧破碎による非在来型資源の開発・採掘を禁じる法」を制定。米ニューヨーク州は2014年12月17日、州内でシェールガスの採掘を事実上、禁止する方針。採掘手段が、環境汚染を通じ人体に悪影響を及ぼす危険性を排除できないためと説明される。米国ではバーモント州に続いて2例目となる。今後の動きが注目される。特に、日本のメタンハイドレート技術への波及する可能性がある。

簡単に紹介したい。上記のモデル分類では、最適化モデルの範疇にはいる。

$$\text{原油総需要} \quad X_{oil,t}^D = \alpha_0 + \alpha_1 p_{oil,t} + \alpha_2 X_{oil,t-1}^D + \alpha_3 \lambda^t \quad (2.1)$$

$$\text{非 OPEC 産油国の生産} \quad X_{oil,t}^{S\_nopec} = (\beta_0 + \beta_1 p_{oil,t}) \delta^{-H_{oil,t}^{S\_nopec} / \gamma} + \beta_3 X_{oil,t-1}^{S\_nopec} \quad (2.2)$$

$$\text{非 OPEC 産油国の累積生産} \quad H_{oil,t}^{S\_nopec} = H_{oil,t-1}^{S\_nopec} + X_{oil,t}^{S\_nopec} \quad (2.3)$$

最初の原油需要の総量が式(2.1)で決まり、その内の非 OPEC の取り分が式(2.2)で記述され（ただし非 OPEC の累積生産が今期生産を減少するよう作用）、残りの OPEC 需要が下で決まる。

$$\text{OPEC に対する原油需要} \quad X_{oil,t}^{D\_opec} = X_{oil,t}^D - X_{oil,t}^{S\_nopec} \quad (2.4)$$

$$\text{OPEC 原油埋蔵量} \quad R_{oil,t}^{opec} = R_{oil,t-1}^{opec} - X_{oil,t}^{D\_opec} \quad (2.5)$$

これだけでは何の変哲もないモデルであるが、ピンダイクらしいのは価格の決定に工夫を凝らしている点である。すなわち以下の目的関数を最大化するように今期価格を決める。

$$F_{oil,t}^{opec} = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\delta)^t} \left( \frac{p_{oil,t} - 250}{R_{oil,t}^{opec}} \right) X_{oil,t}^{D\_opec} \quad (2.6)$$

OPEC は資源の枯渇を視野において、枯渇までの期間 T をタイムスパンの中で、現在価値になおした利益を決定するよう最適な当期価格を計算する。

1986 年からは石油価格の決定権は自由市場へと移ったが、OPEC の生産は 2007 年においても全世界の原油生産量の 42%、石油埋蔵量の 3 分の 2 を占めて圧倒的な力を秘め、石油供給の鍵を握る存在は変化しない。価格支配力はないが、生産などを通して原油価格に影響を及ぼすことができる存在となっているので、この点は以下の本稿のモデル展開で重要な鍵となる。

#### b)90 年代以降

N.Krichene(2005)は、原油需給 2 本、天然ガス需給 2 本の合計 4 本の単純なモデルを展開し、合理的期待形成を、原油と天然ガスの供給関数の価格に採用している。しかし合理的期待形成はモデルがもつ合理性へ急激な変化をモデルに強い、モデルが現実から少しでも外れると、現実をうまく追尾しえないだろう。彼らのモデルを一瞥しよう。

$$\text{①原油需要} \quad X_{oil,t} + \delta_{12} p_{oil,t} + \gamma_{11} gdp7_t + \gamma_{14} z_t = u_{1,t} \quad (2.7)$$

$gdp7_t$  : 先進 7 ヶ国の実質 GDP 指標

$z_t$  : コンスタント項

原油の需要関数で、原油価格と先進国 7 ヶ国実質 GDP に依存している。

$$\textcircled{2}\text{原油供給} \quad X_{oil,t} + \delta_{22}p_{oil,t}^e + \delta_{23}X_{gas,t} + \gamma_{22}\tilde{p}_{oil,t} + \gamma_{24}z_t = u_{2,t} \quad (2.8)$$

$\tilde{p}_{oil,t}$  : 原油価格の大きなうねりを表すダミー変数

原油の供給関数で、原油の期待価格とその大きなうねり、代替する天然ガスの生産が関与している。式(2.8)と式(2.9)を連立して解いて、原油生産  $X_{oil,t}$  と原油価格  $p_{oil,t}$  をだす。

$$\textcircled{3}\text{天然ガス需要} \quad X_{gas,t} + \delta_{34}p_{gas,t} + \gamma_{31}gdp7_t + \gamma_{34}z_t = u_{3,t} \quad (2.9)$$

天然ガスの需要関数で、原油と同じく、天然ガス価格と先進国7ヶ国実質GDPに依存している。

$$\textcircled{4}\text{天然ガス供給} \quad \delta_{41}X_{oil,t} + X_{gas,t} + \delta_{44}p_{gas,t}^e + \gamma_{43}\tilde{p}_{gas,t} + \gamma_{44}z_t = u_{4,t} \quad (2.10)$$

$\tilde{p}_{gas,t}$  : 天然ガスの価格の大きなうねりを表すダミー変数

天然ガスの供給関数で、原油と同じく、天然ガスの期待価格と価格の大きなうねり、および原油生産が関与している。式(2.9)と式(2.10)を連立させて、天然ガス生産  $X_{gas,t}$  と天然ガス価格  $p_{gas,t}$  について解く<sup>2</sup>。このモデルの問題点は、合理的期待形成の採用と、2つの価格にまつわる「大きなうねり」を表す恣意的な変数 ( $\tilde{p}_{oil,t}, \tilde{p}_{gas,t}$ ) の存在である。いずれも価格形成に深く関わっている。

曾我正美・中塚誠次(2004)は、17種の原油→9ヶ所の製油所→7個の需要地域を結ぶ物流に関するある種のSCMのための世界最適モデルを展開している。経済モデルというより実務型モデルと言えよう。

石油価格は当然のことながら各国経済に影響を与えるのであり、N.Krichene(2006)やL.Kilian(2008)はこれについて触れている。原油価格は各国国内価格を押し上げ、金融政策にも波及する。また逆に、金融政策は国内需要に波及し、下でみるように石油需要や天然ガス需要を通して原油価格や天然ガス価格にも降りかかる。

### 3. 原油・天然ガス市場の同質的寡占モデル

#### 3.1 原油市場モデル

##### 同質財寡占モデル

寡占市場の定義は、寡占企業の行動が相手の行動に影響を与えることである。寡占市場には同質財寡占と製品差別化寡占があるが、原油は品質の若干の差はあるものの、ほぼ同質財として扱うことにする<sup>3</sup>。寡占市場の生産量と寡占価格の決定については、ミクロ経済学で幾つかの考えがある。(A.Mas-Colell, M.D. Whinston and J.R.Green(1995)を参照) 標準

<sup>2</sup> 合理的期待形成のモデル解法は補論5を参照。

<sup>3</sup> 寡占市場でも参入退出が自由な市場はコンテストブル市場と呼ばれるが、以下で扱う原油や天然ガス市場は参入退出が自由でない。また需要側も無数に国がある訳ではなく、それは需要の寡占状態と言えなくもないが、需要国間の協調関係は希薄であり、また製品がほぼ同質とみて、供給側の同質的寡占モデルというのが妥当と思われる。

的なクールノーの考えは、利潤極大化から生産量を決定し、需給均衡方程式から価格を導出する。シュタツケルベルグの理論は、クールノー・モデルに先導者と追随者の違いを導入。またそれらの動学化も図ることもできる。一方、ベルトランの考えは、利潤極大化から価格を導く。エッジワースはベルトランの競争企業の付帯条件を改善した。ベルトランの価格競争は製品差別化競争の記述に向いている。原油・天然ガス市場の同質型寡占市場の記述には、クールノー型モデルが適していると考える。ただ、以下で述べるように、本稿の記述はクールノー型モデルに近いが、クールノーの原モデルと異なっている。彼我の違いは以下で詳しく見る。

### 需給均衡方程式

原油市場について、原油には多少の質の差があるものの、ほぼ同質財として扱い、製品同質寡占モデルとして提示する。ここで上で述べたように消費地毎に区分けされているのが現実の市場であるが、唯一の世界原油市場があると想定し、代表的な市場価格である NY の WTI 原油価格等を内生化する<sup>4</sup>。WTI 原油は世界の原油需給を迅速に反映するため、しばしば経済分析に用いられる。原油という用語は、地下から産出した状態の未精製の石油のことであり、石油は、原油およびこれを精製して得られる各種石油製品（灯油など）の総称である。我々が消費するのは石油であって原油 Crude Oil ではない。

さて各国の経済活動水準の決定は一次エネルギー需要全体を決める（補論 2 参照）。別に示す各国別 AHP モデル（補論 4 参照）から、社会状況が一次エネルギー全体をエネルギー種別需要に配分する。このことから第 k 国の石油需要  $D_{oil,t}^k$  が決まる。この時、原子力  $D_{nuc,t}^k$ 、天然ガス  $D_{gas,t}^k$  や石炭  $D_{col,t}^k$  の各国需要も石油と同時に決まる。

#### a) 原油需要

$$X_{oil,t}^D = \alpha_0 - \alpha_1 p_{oil,t} + \alpha_2 p_{oil,t-1} + \alpha_3 \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k \quad (3.1)$$

$$\alpha_0 \geq 0 \quad \alpha_1 > 0 \quad \alpha_3 > 0$$

$X_{oil,t}^D$  : 世界全体の原油需要

$D_{oil,t}^k$  : 第 k 国の石油需要

$p_{oil,t}$  : 原油価格（NY の WTI など代表的価格、北海油田価格でも可）

$N$  : 取り上げる需要国の数

原油需要は当期の価格にネガティブに反応する<sup>5</sup>。1 期前の原油価格はプラスもマイナスもあり得る、またゼロでも構わない。プラスの場合、1 期前の原油価格は当期には低下すると期待し原油需要が増加する。逆にマイナスの場合、1 期前の価格は当期にも存続するものと

<sup>4</sup> WTI(West Texas Intermediate)は、アメリカ合衆国のテキサス州西部とニューメキシコ州南東部で産出する低硫黄の軽質原油で、硫黄分が少ないため、ガソリンや灯油などを多く取り出せるのが特徴である。

<sup>5</sup> 原油価格には、直物価格、先物価格、先渡価格があるが、ここでは直物価格を採用している。3 つ価格を同時にモデル化するのは、価格モデルが煩雑になるので避ける。

期待し原油需要が減退する。ゼロの場合、1期前の価格は今期の需要に影響しない。

b)原油供給（定義式）

$$X_{oil,t}^S = \sum_{k=1}^M S_{oil,t}^k \quad (3.2)$$

$X_{oil,t}^S$  : 世界全体の原油供給

$S_{oil,t}^k$  : 第 k 産油国の原油供給（寡占状況）

$M$  : 取り上げる産油国の数<sup>6</sup>

各国の原油供給  $S_{oil,t}^k$  は何らかの経済合理性の上に決定される。これについては後述する。

c)需要と供給の一致

$$X_{oil,t}^D = X_{oil,t}^S = X_{oil,t} \quad (3.3)$$

需要と供給はデータ上区別できないので、需要も供給も一致しているとみなす。

### 原油価格決定式

式(3.1)と式(3.2)を式(3.3)に代入すると以下が得られる。需給が均衡するように価格が変化すると解釈される。

$$\alpha_0 - \alpha_1 p_{oil,t} + \alpha_2 p_{oil,t-1} + \alpha_3 \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k = \sum_{k=1}^M S_{oil,t}^k \quad (3.4)$$

したがって(3.4)式を価格決定式とみなす。当期の価格について、(3.4)式を整理すると以下の価格決定式が得られる。

$$p_{oil,t} = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} p_{oil,t-1} + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k - \frac{1}{\alpha_1} \sum_{k=1}^M S_{oil,t}^k \quad (3.5)$$

さて価格決定式の推計では、

$$p_{oil,t} = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} p_{oil,t-1} + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k - \frac{1}{\alpha_1} \sum_{k=1}^M S_{oil,t}^k + u_{oil,t} \quad (3.6)$$

と確率誤差を付加しておこなう<sup>7</sup>。

式(3.6)の意味するところは重要で、第2項より1期前の価格は、前にも述べたようにプラスとマイナス双方に当期価格に影響を与える。各国の需要  $D_{oil,t}^k$  の増加（中国、将来のインド等）は第3項より価格を上昇に導き、逆に供給  $S_{oil,t}^k$  の増加は第4項より価格を低下させる。70年代の2度にわたって起こったオイルショックは、その逆で生産削減による価格上昇だった。また原油市場へのヘッジファンドの介入行為は、確率誤差とみなされよう。すなわち先物相場への買い行為は価格を上昇させ、逆に売り行為は価格低下を引き起こす。これは為替市場やコール市場への中央銀行の介入操作と同じ意味合いをもつものである。

<sup>6</sup> 需要国と産油国は世界全体を取り上げる必要はなく、主要需要国と主要産油国で構わない。したがって需要国と産油国には、数と内容に異動がある。

<sup>7</sup> 本稿は式(3.6)に変形しておいて推定するが、需要関数(3.1)を推定し、推定されたパラメータを式(3.5)に代入して価格決定を扱う方式もある。前者の方式が優れている。

こうした操作は、米国シェールガス採算化阻止、さらにはメタンハイドレートへの商業化阻止<sup>8</sup>、ロシア経済への牽制、制裁などに使われる可能性もある<sup>9</sup>。確率誤差は、上で述べた経済要因以外の政治的、自然的環境的、あるいは人口的要因など、経済以外の要因群の複合を表現している<sup>10</sup>。

### 価格安定を志向する国の最適原油生産

世界最大の石油生産をするサウジアラビアは、原油生産にまつわる利潤を最大化すると仮定するが、サウジアラビアは親欧米派であり、原油価格の安定化も目的としていると考える。したがって以下の拡張的利潤をもつと仮定する。

$$\pi_{oil,t}^k = -\frac{1}{2} w_{oil}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1})^2 + \frac{1}{S_{oil,t}^{k*}} (p_{oil,t} S_{oil,t}^k - C_{oil,t}^k) \quad (3.7)$$

$C_{oil,t}^k$  : 原油生産の総コスト

$S_{oil,t}^{k*}$  : 正常生産（平均的レベルの生産）価格変数との調整項

拡張的利潤を最大化することで生産量  $S_{oil,t}^k$  を決定しているとする。ただし  $\partial S_{oil,t}^{k*} / \partial S_{oil,t}^k = 0$  としている。また定義的に  $\partial C_{oil,t}^k / \partial S_{oil,t}^k = MC_{oil,t}^k$ （限界コスト）となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_{oil,t}^k}{\partial S_{oil,t}^k} &= -w_{oil}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1}) \frac{\partial p_{oil,t}}{\partial S_{oil,t}^k} + \frac{1}{S_{oil,t}^{k*}} \left( p_{oil,t} + \frac{\partial p_{oil,t}}{\partial S_{oil,t}^k} S_{oil,t}^k - \frac{\partial C_{oil,t}^k}{\partial S_{oil,t}^k} \right) \\ &= -w_{oil}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1}) \frac{\partial p_{oil,t}}{\partial S_{oil,t}^k} + \frac{1}{S_{oil,t}^{k*}} \left( p_{oil,t} + \frac{\partial p_{oil,t}}{\partial S_{oil,t}^k} S_{oil,t}^k - MC_{oil,t}^k \right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

ここで主体は客観的な価格決定式を知っているのではなく、根岸流主観的需要関数を通して、需要関数を主観的に憶測しているとみなし、 $\partial p_{oil,t} / \partial S_{oil,t}^k = -\lambda_{oil}^k$  と仮定し、上式に代入

<sup>8</sup> 石油・天然ガスは地面下もしくは海底面下深部に存在するが、海洋のメタンハイドレートは海底面から海底面下 500m の浅部に存在。生産開始を 2021 年に設定、生産期間を 15 年としている。メタンの回収方法に色々あり、方法により回収コストが異なる。有力な減圧法の試算では、46 円/m<sup>3</sup>~92 円/m<sup>3</sup> という数値がある。2008 年における LNG の輸入価格は約 40 円/m<sup>3</sup>、2008 年は原油価格上昇の影響でスポット月平均約 70 円/m<sup>3</sup> という時期もあった。減圧法下の試算でも幅があり、回収法にも差があり、さらに 2021 年時点での天然ガスの価格も予測し難い不確実な現状で、踏み出しにくい現状ではある。ただ近い将来、インドを始めとする発展途上国が多大なエネルギー消費をする可能性があり、それが開発の追風にはなろう。国内的には 50 円/m<sup>3</sup> できる回収の技術開発を模索すべきである。なお安倍政権は、2013 年 4 月の海洋基本計画で 2018 年の商業化を閣議決定した。

<sup>9</sup> 最近の原油価格の低下は、ウクライナ問題で強引なロシア経済に打撃を与えようとの意図の可能性がある。

<sup>10</sup> 筆者の、一次産品の別の代表である野菜類の価格形成を築地卸売市場の月次データで推定の経験では、5 割の説明力をもつのは少なく、大方 3 割程度の説明力しか持ちえない。台風等の経済以外の要因が強く働く市場であると解釈できる。



すると以下を得る。(T.Negishi(1961)を参照)<sup>11</sup>

$$w_{oil,t}^k \lambda_{oil,t}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1}) + \frac{1}{S_{oil,t}^{k*}} (p_{oil,t} - \lambda_{oil,t}^k S_{oil,t}^k - MC_{oil,t}^k) \quad (3.9)$$

最大化するので上をゼロとおく。

$$w_{oil,t}^k \lambda_{oil,t}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1}) + \frac{1}{S_{oil,t}^{k*}} (p_{oil,t} - \lambda_{oil,t}^k S_{oil,t}^k - MC_{oil,t}^k) = 0 \quad (3.10)$$

さらに事後的に  $S_{oil,t}^{k*} = S_{oil,t}^k$  とおくことで以下を得る。

$$w_{oil,t}^k \lambda_{oil,t}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1}) S_{oil,t}^k = (-p_{oil,t} + \lambda_{oil,t}^k S_{oil,t}^k + MC_{oil,t}^k) \quad (3.11)$$

$$(1 - w_{oil,t}^k p_{oil,t} + w_{oil,t}^k p_{oil,t-1}) S_{oil,t}^k = (p_{oil,t} - MC_{oil,t}^k) / \lambda_{oil,t}^k \quad (3.11)$$

$$\tilde{S}_{oil,t}^k = \frac{(p_{oil,t} - MC_{oil,t}^k)}{\lambda_{oil,t}^k (1 - w_{oil,t}^k p_{oil,t} + w_{oil,t}^k p_{oil,t-1})} = \frac{(p_{oil,t} - MC_{oil,t}^k)}{\lambda_{oil,t}^k (1 - w_{oil,t}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1}))} \quad (3.12)$$

(3.12)式の意味するところは、限界コストの上昇は生産を減少さす。原油価格の上昇は生産を増加さす。推定では、限界コストは不明の場合が多く、簡易的に賃金率を使用する。ここに2つの未知パラメータ  $(w_{oil,t}^k, \lambda_{oil,t}^k)$  が介在する。上の展開は最適な生産額であり、諸種の理由から最適な生産額は実現されず、部分的にしか実現されないとする。したがって以下の定式化をとる。

$$S_{oil,t}^k - S_{oil,t-1}^k = \rho_{oil}^{k0} + \rho_{oil}^{k1} \{ \tilde{S}_{oil,t}^k - S_{oil,t-1}^k \} \quad (3.13)$$

式(3.13)を整理すると以下を得る。

$$S_{oil,t}^k = \rho_{oil}^{k0} + (1 - \rho_{oil}^{k1}) S_{oil,t-1}^k + \frac{\rho_{oil}^{k1} (p_{oil,t} - MC_{oil,t}^k)}{\lambda_{oil,t}^k (1 - w_{oil,t}^k (p_{oil,t} - p_{oil,t-1}))} \quad (3.14)$$

### 利潤最大化のみを志向する国の最適原油生産

価格の安定化は考慮せず、単純に利潤のみの最大化を目指すと仮定する。

$$\pi_{oil,t}^k = p_{oil,t} S_{oil,t}^k - C_{oil,t}^k \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \pi_{oil,t}^k}{\partial S_{oil,t}^k} = p_{oil,t} + \frac{\partial p_{oil,t}}{\partial S_{oil,t}^k} S_{oil,t}^k - \frac{\partial C_{oil,t}^k}{\partial S_{oil,t}^k} = p_{oil,t} - \lambda_{oil,t}^k S_{oil,t}^k - MC_{oil,t}^k = 0 \quad (3.16)$$

<sup>11</sup> 根岸流主観的需要を導入するすることのメリットは、推定時に各国毎異なるパラメータを推定できる点にある。でなければ同じパラメータの推定となり、システム推定が必要になる。その際、(3.5)式あるいは(3.6)式の価格決定式の推定にも波及する。

したがって最適な生産は以下となる。

$$S_{oil,t}^k = (p_{oil,t} - MC_{oil,t}^k) / \lambda_{oil}^k \quad (3.17)$$

この場合も最適額が実現されずに調整されると仮定すると以下となる。

$$S_{oil,t}^k = \rho_{oil}^{k0} + (1 - \rho_{oil}^{k1}) S_{oil,t-1}^k + \frac{\rho_{oil}^{k1}}{\lambda_{oil}^k} (p_{oil,t} - MC_{oil,t}^k) \quad (3.18)$$

推定は線形推定で処理が可能となる。

### 共同利潤の最大化

石油輸出国機構(Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC) は、国際石油資本などから石油産出国の利益を守ることを目的として、1960年9月14日に設立。加盟国は当初5ヶ国であったが現在12ヶ国が加盟している。OPECが石油価格の決定権を握ったのは、1973年の第1次石油ショック時である。近時、1999年に全加盟国が協調して生産調整を行い、これによって原油価格を引き上げた。2000年代にもこの協調は続き、新興国の需要増大によって石油価格は高値が続き、OPECの影響力も再び強まった。そうした経済行為は、ミクロ経済学の共同利潤の最大化になっている。詳細な式の展開は省略。

### 天然ガス市場との相互依存－石油と天然ガスの財の代替性－<sup>12</sup>

原油市場と天然ガス市場との相互依存関係は、2つの市場の価格を通してなされる可能性があるので、そうであるなら一般には、需要関数に価格でなく、天然ガス価格との相対価格の形を採用すべきである。したがって、(3.1)式に代わって以下の2つの代替式が成立する。

$$X_{oil,t}^D = \alpha_0 - \alpha_1 p_{oil,t} + \alpha_2 p_{oil,t-1} + \alpha_3 p_{gas,t} + \alpha_4 \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k \quad (3.19a)$$

$$X_{oil,t}^D = \alpha_0 - \alpha_1 \left( \frac{p_{oil,t}}{p_{gas,t}} \right) + \alpha_2 p_{oil,t-1} + \alpha_3 \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k \quad (3.19b)$$

$p_{gas,t}$  : 天然ガスの価格

つまり原油価格の上昇は前と同じように原油需要を減少させるが、天然ガスの価格の上昇は、2つのエネルギー源の代替性を通して、原油需要を上昇せしむる。この場合、価格の決定は、式(3.5)に代わって、以下の2つが決定されることとなる<sup>13</sup>。

$$p_{oil,t} = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} p_{oil,t-1} + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} p_{gas,t} + \frac{\alpha_4}{\alpha_1} \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k - \frac{1}{\alpha_1} \sum_{k=1}^M S_{oil,t}^k \quad (3.20a)$$

$$\frac{p_{oil,t}}{p_{gas,t}} = \frac{\alpha_0}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} p_{oil,t-1} + \frac{\alpha_3}{\alpha_1} \sum_{k=1}^N D_{oil,t}^k - \frac{1}{\alpha_1} \sum_{k=1}^M S_{oil,t}^k \quad (3.20b)$$

<sup>12</sup> この場合は、原油市場の需要関数に天然ガス価格が関与するケースである。つまり天然ガス価格が上昇し、天然ガスから原油に需要がシフトし、原油価格が上昇する。

<sup>13</sup> 原油市場の価格形成は、比較的天然ガス価格とは独立に形成される傾向にあり、式(3.5)や式(3.6)でも十分であろう。むしろ天然ガス価格の形成が原油価格の影響を受けやすい傾向が窺われる。

こうして原油市場と天然ガス市場は、2つの価格を通して結び付けられる。

### 3.2 天然ガス市場モデル

天然ガス市場も製品同質寡占として、原油市場と同様の展開が可能である。需要関数、供給の定義式、需給均衡式は以下となる。米国のヘンリーハブ価格（米国ルイジアナ州にある、パイプラインが交差するガス集積地ヘンリーハブの価格）を採用する<sup>14</sup>。以下順に、天然ガス需要、天然ガス供給、天然ガス需給均衡式である。

$$X_{gas,t}^D = \beta_0 - \beta_1 \left( \frac{p_{gas,t}}{p_{oil,t}} \right) + \beta_2 p_{gas,t-1} + \beta_3 \sum_{k=1}^N D_{gas,t}^k \quad (3.21)$$

$$X_{gas,t}^S = \sum_{k=1}^M S_{gas,t}^k \quad (3.22)$$

$$X_{gas,t}^D = X_{gas,t}^S = X_{gas,t} \quad (3.23)$$

したがって天然ガスの価格は以下となる。

$$\frac{p_{gas,t}}{p_{oil,t}} = \frac{\beta_0}{\beta_1} + \frac{\beta_2}{\beta_1} p_{gas,t-1} + \frac{\beta_3}{\beta_1} \sum_{k=1}^N D_{gas,t}^k - \frac{1}{\beta_1} \sum_{k=1}^M S_{gas,t}^k \quad (3.24)$$

原油市場でのサウジアラビアのような存在があるのかも知れない。

## 4. 原油・天然ガス市場の実証分析

### 4.1 データ

基本的に IEA のデータに依拠している。原油価格は米国 WTI が望ましいが、近年時からしなく、より長い時系列が利用可能な北海油田価格の四半期データを暫定的に使用している。また原油生産は IEA、石油需要は end use の年次データを利用するが、年次データを四半期に変換している。

### 4.2 原油市場の実証

原油市場の価格決定式と産油国の供給関数は以下となる。

<sup>14</sup> 天然ガスの価格は地域的な違いが大きいと言われる。市場が十分に成熟していないのかも知れない。ここで地域ごとに異なる市場を想定するのは煩雑なので、原油市場と同じく、統一市場を仮定してモデル化している。

表 1 : 原油市場の価格決定関数

Dependent Variable: P OIL NORTHSEA  
 Method: Least Squares  
 Date: 01/08/15 Time: 16:45  
 Sample (adjusted): 1990Q2 2012Q4  
 Included observations: 91 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
XS OIL	-6.15E-06	7.90E-06	-0.779316	0.4379
XD OIL	1.73E-05	1.92E-05	0.898262	0.3715
DUM2008Q2	26.19576	8.532701	3.070043	0.0029
P OIL NORTHSEA(-1...	0.964418	0.033045	29.18529	0.0000
R-squared	0.936368	Mean dependent var		42.93505
Adjusted R-squared	0.934174	S.D. dependent var		32.46609
S.E. of regression	8.329715	Akaike info criterion		7.120496
Sum squared resid	6036.422	Schwarz criterion		7.230864
Log likelihood	-319.9826	Durbin-Watson stat		1.493679

供給国と需要国の係数の符号条件は満たされているが、統計的有意性は低い。したがって推定にはさらなる工夫が必要。1 期前の価格が大方を説明していると言える。

表 2 : 産油国の供給関数

	定数項	1 期前生産	原油価格	決定係数
アルジェリア			negative	
アンゴラ	1211.921	0.971277	22.69859	0.986573
ブラジル			negative	
カナダ	2646.611	0.980670	21.55806	0.988483
中国	2029.705	0.989681	10.34029	0.989986
インドネシア	-1604.226	1.016263	5.769786	0.987835
インド	2244.262	0.936833	5.056130	0.917553
イラン			negative	
イラク	4476.074	0.910363	90.24212	0.898201
カザフスタン	2145.836	0.954086	21.13273	0.980151
リビア <sup>15</sup>	41754.11	0.386266	157.7104	0.897142
メキシコ			negative	
ナイジェリア	8690.840	0.922452	13.09563	0.912415
ノルウエー			negative	
カタール	727.7602	0.976253	21.15632	0.991216
クエート	6698.579	0.912332	82.08997	0.907730
ロシア	169384.4	0.502783	903.8746	0.699391

<sup>15</sup> 2011 年の年次ダミーを使用している。

サウジアラビア	116556	0.722455	332.2402	0.882016
UAE	22564.89	0.791992	87.76141	0.941963
米国	-3415.432	0.999839	71.83100	0.967650
ベネズエラ			negative	

推定は賃金率が暫定的に利用可能でないので、それをうけない推定を示している。原油価格が negative とあるのは、本来のプラスの符号がみだされていないことを示す。それ以外は概ね良好な推計結果を示している。

### 4.3 天然ガス市場の実証

天然ガス市場の価格決定式とガス算出国の供給関数は以下となる。

表 3 : 天然ガスの価格決定関数

Dependent Variable: P GAS HENRYHUB  
Method: Least Squares  
Date: 03/14/15 Time: 22:32  
Sample (adjusted): 1997Q2 2012Q4  
Included observations: 63 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	1.333177	4.972040	0.268135	0.7895
P GAS HENRYHUB(-...)	0.789398	0.066672	11.83997	0.0000
XS GAS	-1.22E-05	4.06E-06	-2.997510	0.0040
XD GAS	2.42E-05	1.18E-05	2.052605	0.0446
P OIL NORTHSEA	0.032863	0.012248	2.683148	0.0095
R-squared	0.782077	Mean dependent var		4.808519
Adjusted R-squared	0.767048	S.D. dependent var		2.338279
S.E. of regression	1.128573	Akaike info criterion		3.155824
Sum squared resid	73.87333	Schwarz criterion		3.325914
Log likelihood	-94.40847	Hannan-Quinn criter.		3.222722
F-statistic	52.03722	Durbin-Watson stat		1.485640
Prob(F-statistic)	0.000000			

供給と需要の符号条件はみたされ、またその統計的有意性も高い。1 期前の天然ガス価格の説明力は原油と同じように高い。原油価格との相対価格効果も検出されている。

表 4 : 天然ガスの供給関数

	定数項	1 期前	天然ガス価格	決定係数
アルジェリア	13449.03	0.802379	125.1676	0.886800
カナダ			negative	
中国	-115.1704	1.006250	203.4132	0.990346
イラン	1212.708	0.996357	124.3000	0.991044
インドネシア			negative	
マレーシア na				
オランダ na				

ノルウエー	1723.542	0.984704	54.10876	0.981408
カタール	404.6624	1.020133	137.2010	0.982349
ロシア	48776.17	0.894832	1031.690	0.842853
トルクメニスタン na				
サウジアラビア	496.0406	0.999904	29.60328	0.982310
ウズベキスタン na				
米国	-19981.74	1.043043	433.0395	0.955107

国名の横の na はデータがなく推定がなされない。天然ガス価格の negative は本来の符号条件が満たされない結果を示す。それ以外は概ね良好な結果を示している。

## 5. 結語

原油市場と天然ガス市場の2つの市場は需給関係が価格を決定するというミクロ経済学の上に乗っており、分析モデルは概ね正しい定式化を示していると言える。こうした鉱産物市場の定式化は、他のレアメタル市場にも応用が可能である。最近、中国経済の停滞により鉄鉱石価格が低下しているのも、こうした事情を反映しているものであると言える。

## 参考文献

- G.C.Chow,1975,Analysis and Control of Dynamic Economic Systems,John Wiley and Sons,Inc.
- De Grauwe, P. and T.Peeters,1983,Exchange Rates in Multicountry Econometric Models, St. Martin's Press:New York.
- 江口高顕,1986,原油価格モデルー最適化型とシミュレーション型の結合ー,日本経済研究,No.15.
- Friedman,J.W.,1977,Oligopoly and the Theory of Games,North Holland Publishing Company.
- Klein,L.R.,1983,Lectures of Econometrics,North-Holland Publishing Company.
- Kilian,L.,2008,"Exogenous Oil Supply Shock: How Big Are They and How Much Do They Matter for the US Economy?," The Review of Economics and Statistics, Vol.90,pp216-240.
- Krichene,N.,2005,"A Simultaneous Equations Model for World Crude Oil and Natural Gas Markets," IMF Working Paper.
- Krichene,N.,2006,"World Crude Oil Markets: Monetary Policy and Recent Oil Shock," IMF Working Paper.
- 小坂弘行,1994,エコライト制度によるCO2排出規制の検討ー多国間計量経済モデルを用いてー,第11回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演報告集,pp.301-305.
- 小坂弘行,1994,グローバルシステムのモデル分析,有斐閣.

Kosaka,H.,2013,On the Interpolation of Asian Input Output Data for Intermediate Years by the Use of Model : A Non-Survey Method, SFC-DP 2013-002.

熊倉修,1983,国際石油市場のモデル分析,電力経済研究,No.17.

熊倉修,1990,世界エネルギーモデル,電力経済研究,No.27.

Mas-Colell,A.,M.D.Whinston and J.R.Green,1995,Microeconomic Theory,Oxford Univrsity Press.

Negishi,N.,1961,“Monopolistic Competition and General Equilibrium,” Review of Economic Studies,Vol.28,No.3,pp.196-201.

佐和隆光・荒井泰男,1980,石油市場モデル,電力経済研究,No.15.

曾我正美・中塚誠次,2004,国際石油価格適正化検討のための世界統合 LP モデルの構築,オペレーションズ・リサーチ,2004年11月号(第49巻).

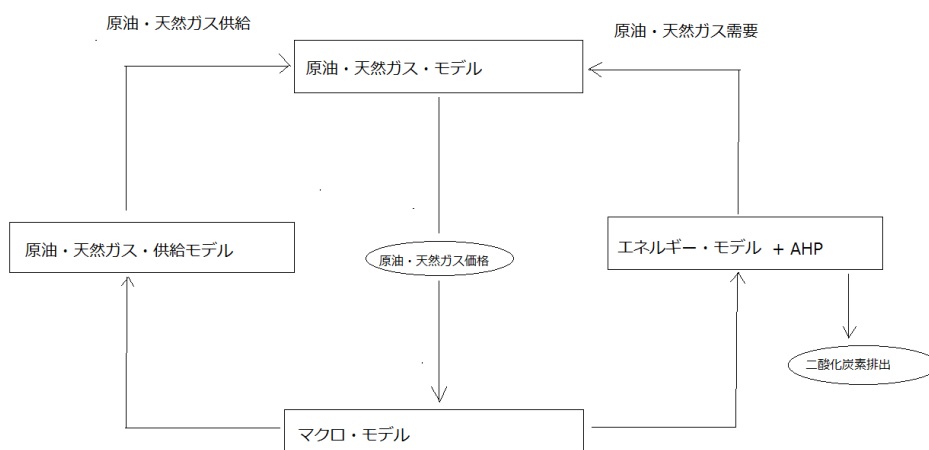
Yano,T. and H.Kosaka,2001,Assessing Optimal CO2 Abatement Policies for the Kyoto Protocol: A Genetic Algorithms Approach, the 41st European Congress of the European Regional Science Association, August 29th - September 1st,Zagreb, Croatia.

### 補論 1 : 全体の分析の流れ

4つのモデル、すなわち原油・天然ガス市場モデル(上の本文)、マクロ・エネルギーモデル(補論 2)、AHP モデル(補論 4)、原油・天然ガス供給モデルは、以下のような相互依存を示す。

マクロ・エネルギーモデルの最終エネルギー需要・一次エネルギー需要→AHP モデルで一次エネルギー種別配分→原油・天然ガス市場モデルの原油価格・天然ガス価格→マクロ・エネルギーモデル(補論 2)

補表 1 : モデル群の相互依存関係図



## 補論 2 : マクロ・エネルギーモデル

マクロ・エネルギーモデル、あるいはマクロ二酸化炭素排出モデルについて述べる。マクロの経済活動からエネルギー需要が生まれるので、マクロモデルの上に、エネルギー需要部門をリンクする。マクロモデルについては、クラインの骨格モデル(1983)を採用する。骨格モデルであるので、基本モデルを幾らでも複雑にすることができる。特徴は実物経済が中心で金融関係があまり詳細に述べられない。

### 内生変数 : モデルで説明される変数

$C_t$ : 実質個人消費	$Y_t$ : 名目個人可処分所得	$p_t$ : 一般物価水準
$I_t$ : 実質投資(民間+政府)	$X_t$ : 実質 GDP	$r_t$ : 名目金利(国債金利)
$K_t$ : 実質期末資本ストック	$EX_t$ : 実質輸出	$IM_t$ : 実質輸入
$L_t$ : 雇用量	$w_t$ : 賃金率	$LF_t$ : 労働力
$D_t$ : 実質資本減耗	$T_{1t}$ : 名目間接税	$T_{2t}$ : 名目個人税
$T_{3t}$ : 名目法人税	$T_{rt}$ : 名目個人移転	$P_t$ : 名目法人利潤

### 外生変数 : 外から与えられる変数

$G_t$ : 実質政府支出	$WT_t$ : 実質世界貿易取引量	$p_{wt}$ : 世界貿易価格
$p_{mt}$ : 輸入価格	$N_t$ : 人口	$M_t$ : 名目通貨供給

### 実質 GDP の定義式

$$X_t = C_t + I_t + G_t + EX_t - IM_t \quad (A2.1)$$

右辺の需要のあり方が左辺の供給額を決定すると説明される重要な式。より詳細には、投資は民間と政府(公共投資)、住宅投資、在庫投資も加わる。最終需要のみ取り上げられ、中間需要(原材料需要)は捨象されている。

### 名目 GDP の定義式

$$p_t X_t = Y_t + (T_{1t} + T_{2t} + T_{3t} - T_{rt}) + p_t D_t \quad (A2.2)$$

名目 GDP の定義式であるが、この式より名目可処分所得が決定するとみる。すなわち(A2.2)を変形して以下。

$$Y_t = p_t X_t - (T_{1t} + T_{2t} + T_{3t} - T_{rt}) - p_t D_t \quad (A2.2)'$$

### 国民所得の定義式

$$w_t L_t + P_t = Y_t + (T_{2t} + T_{3t} - T_{rt}) \quad (A2.3)$$

国民所得(賃金と利潤の和)の定義式であるが、これより名目法人利潤  $\pi_t$  が決定する。

$$\pi_t = Y_t + (T_{2t} + T_{3t} - T_{rt}) - w_t L_t \quad (A2.3)'$$

### 資本ストックの定義式

$$K_t = K_{t-1} + I_t - D_t \quad (A2.4)$$

つぎに行動方程式と技術関係式について説明。

### 消費関数



$$\frac{C_t}{N_t} = a_0 + a_1 \left( \frac{Y_t}{N_t p_t} \right) + a_2 \left( \frac{C_{t-1}}{N_{t-1}} \right) + u_{1t} \quad (\text{A2.5})$$

消費行動の説明式（ブラウン型消費）であり、一人当りの消費で定式化している。

#### 投資関数

$$I_t = b_0 + b_1 X_t + b_2 r_t + b_3 K_{t-1} + u_{2t} \quad (\text{A2.6})$$

投資行動を説明している。その中で名目金利  $r_t$  の代わりに実質金利  $(r_t - \Delta \log p_t)$  で置き換えてもよい。

#### 輸出関数

$$EX_t = c_0 + c_1 WT_t + c_2 \left( \frac{p_{wt}}{p_t} \right) + c_3 EX_{t-1} + u_{3t} \quad (\text{A2.7})$$

第2項は所得効果、第3項は相対価格効果を表す。多国間モデルの場合では、貿易モデルが説明する。

#### 輸入関数

$$IM_t = d_0 + d_1 X_t + d_2 \left( \frac{p_t}{p_{mt}} \right) + d_3 IM_{t-1} + u_{4t} \quad (\text{A2.8})$$

第2項が所得効果、第3項が相対価格効果を表している。輸入価格  $p_{mt}$  が外国通貨単位で表現されている場合には、共通通貨に直す必要があり、外国為替レートが陽表的にはいる。

$$IM_t = d_0 + d_1 X_t + d_2 \left( \frac{p_t}{e_t p_{mt}} \right) + d_3 IM_{t-1} + u_{4t} \quad (\text{A2.8})'$$

$e_t$ : 外国為替レート（当該国通貨／ドル）

相対価格の変化はJカーブ効果に見られる如く、時間的経過の後、輸出入に影響することを考えれば、相対価格の項は分布ラグ的定式化が適当かも知れない。

#### 雇用関数

生産関数から以下の労働需要が導かれる<sup>16</sup>。

$$\log L_t = e_0 + e_1 \log X_t + e_2 \log K_{t-1} + e_3 \log L_{t-1} + u_{5t} \quad (\text{A2.9})$$

上の式(1)から生産  $X_t$ 、すなわち実質 GDP が決定される。それを実現するために労働需要  $L_t$  が発生する。

<sup>16</sup> コブ・ダグラス型生産関数を  $X_t = AL_t^a K_{t-1}^b u_t$  とする。この生産関係から望ましい労働需要は、 $L_t$  について解いて  $\log L_t^* = -(1/a) \log A + (1/a) \log X_t - (b/a) \log K_{t-1} - (1/a) \log u_t$  となる。現実の労働需要の変化は、 $\Delta L_t = \mu (\log L_t^* - \log L_{t-1})$  となり、上の式(9)が得られる。

### 価格形成方程式

$$p_t = f_0 + f_1 \left( \frac{w_t L_t}{X_t} \right) + f_2 p_{mt} + u_{6t} \quad (\text{A2.10})$$

所謂マーク・アップ原理による価格決定から、第2項の単位労働費用に加えて第3項の輸入物価の効果を付加している。本来、原材料投入コストが入るが、マクロモデルでは捨象されているので、輸入物価で置き換えられる。

### 賃金形成方程式

通常、フィリップス曲線の議論からは失業率が重要な説明変数となる<sup>17</sup>。しかしここでは内部労働市場の観点から（企業が賃金率を決めること）、物価と労働生産性で説明される。

$$w_t = g_0 + g_1 \left( \frac{X_t}{L_t} \right) + g_2 p_t + u_{7t} \quad (\text{A2.11})$$

内部労働市場だけでなく、外部労働市場においても失業率でなく、労働生産性が説明変数となる理由は次のようである。失業率に変化が起きた時、直ぐに雇用に変化が起き、同時に少しの時間後に生産にも変化を引き起こす。したがって生産と雇用の比率である労働生産性は失業率の変化に置き換えることができる。

### 労働力形成方程式

$$\frac{LF_t}{N_t} = h_0 + h_1 \left( \frac{(LF_t - L_t)}{LF_t} \right) + h_2 \left( \frac{w_t}{p_t} \right) + u_{8t} \quad (\text{A2.12})$$

失業率と賃金と物価の相対比率が説明変数となっている。

### 流通速度方程式

$$\log \left( \frac{p_t X_t}{M_t} \right) = i_0 + i_1 r_t + i_2 \Delta \log p_t + u_{9t} \quad i_1 < 0, i_2 > 0 \quad (\text{A2.13})$$

左辺は貨幣の流通速度で、利子率と物価上昇率が決定する。このような定式化をとった理由は、貨幣の流通速度が安定しているというマネタリストの主張との違いを強調するためである。ここで通貨供給量  $M_t$  は外生変数扱いである。貨幣の需給が利子率を決定するという通常の枠組（LM 曲線の議論）と異なっている<sup>18</sup>。

### 資本減耗方程式

<sup>17</sup> 参考までにクライン骨格モデルでは以下。

$\Delta \log w_t = g_0 + g_1 (LF_t / (LF_t - L_t)) + g_2 \Delta \log p_t + u_{7t}$  左辺は賃金率の上昇率で、第2項は失業率の逆数となっている。フィリップス曲線を前提にした賃金の決定に沿っている。

<sup>18</sup> 通常の貨幣市場の均衡式  $M_t / p_t = kX_t - ar_t$  からは、貨幣の流通速度は、 $1/k = p_t X_t / M_t + (a/k)r_t (p_t / M_t)$  より、 $p_t X_t / M_t = 1/k - (a/k)r_t (p_t / M_t)$  となる。

$$D_t = j_0 K_{t-1} + u_{10,t} \quad (\text{A2.14})$$

つぎに租税制度を表す制度方程式は 4 本ある。

#### 間接税方程式

消費税など間接税は名目 GDP に依存する。

$$T_{1t} = k_0 + k_1 (p_t X_t) + u_{11,t} \quad (\text{A2.15})$$

#### 個人税方程式

所得税は所得に掛かる。

$$T_{2t} = l_0 + l_1 Y_t + u_{12,t} \quad (\text{A2.16})$$

#### 法人税方程式

法人税は利潤に掛かる。

$$T_{3t} = m_0 + m_1 \pi_t + u_{13,t} \quad (\text{A2.17})$$

#### 移転支出方程式

失業手当などの移転支出は、失業者数と賃金率に依存する。

$$T_{4t} = n_0 + n_1 (LF_t - L_t) + n_2 w_t + u_{14,t} \quad (\text{A2.18})$$

以上の 4 本は税関連の制度を表現している。

以上の連立体系において、世界貿易  $WT_t$ 、世界輸出物価  $p_{wt}$ 、輸入物価  $p_{mt}$  は外生変数であるが、これらは世界経済のシステムの中では内生変数となる。

最後に、マクロモデルには含まれていないが、為替レートについて述べる。為替レートは購買力平価、資本移動、貿易収支に依存するとする<sup>19</sup>。

$$\ln e_t = o_1 + o_2 \ln \left( \frac{p_t}{p_t^{US}} \right) + o_3 (r_t^{US} - r_t) - o_4 \left( \frac{EX_t - IM_t}{p_t X_t} \right) \quad (\text{A2.19})$$

$p_t^{US}$ : 米国物価水準     $r_t^{US}$ : 米国名目金利

上式の第 4 項の分子は貿易収支であるが、経常収支でも構わない。したがって以下のことが示唆される。

$o_2 > 0$  : 日本の物価上昇は円安となる

$o_3 > 0$  : 米国の金利上昇は資金が米国に流れ、円安となる

$o_4 > 0$  : 貿易収支（経常収支）の黒字は円高となる

他の要因として期待（投機）が影響している。アベノミックスでも明らかになったように、

<sup>19</sup> P.De Graupel and T.Peeters(1983)に依拠している。

物価上昇を政策が目指すと言ったアナウンスが、物価がまだ上昇していないにも関わらず、円安を誘導したことである。上の為替決定式に従えば、物価上昇は確かに円安を誘導するだろう。その時、投機的に円を売り、ドルを買う行動を促し、それが実際に円安を導くと考える。

以上のマクロモデルにエネルギー部門を付加する。

### 最終エネルギー需要／一次エネルギー需要の決定

生産要素として、労働、資本に加えて最終エネルギーを導入、それらを二重 CES 型生産関数で編制する。

$$X_t = A_t \left[ a_1 L_t^{b_1} + (1 - a_1) H_t^{b_1} \right]^{\frac{1}{b_1}} \quad (\text{A2.20})$$

$$H_t = \left[ a_2 K_t^{b_2} + (1 - a_2) E_{ft}^{b_2} \right]^{\frac{1}{b_2}}$$

$$0 < a_1, a_2 < 1 \quad b_1, b_2 < 1$$

$A_t$  : 生産効率パラメータ     $X_t$  : 生産     $L_t$  : 労働投入

$K_t$  : 資本ストック     $E_{ft}$  : 最終エネルギー投入(生産活動に投入)

$a_1, a_2$  : 分配パラメータ     $b_1, b_2$  : 代替パラメータ

最適化の結果として、最終エネルギー投入  $E_{ft}$  が決まる<sup>20</sup>。

$$\frac{K_t}{E_{ft}} = \left\{ \frac{(1 - a_2)}{a_2} \right\}^{\frac{1}{(b_2-1)}} \left\{ \frac{P_{Kt}}{P_{ft}} \right\}^{\frac{1}{(b_2-1)}} \quad (\text{A2.21})$$

$P_{Kt}$  : 資本の使用者費用     $P_{ft}$  : 最終エネルギー価格

一次エネルギーと最終エネルギーとの関係は以下となる。

$$E_{1t} = f(E_{ft}) \quad E_{1t} : \text{一次エネルギー供給} \quad (\text{A2.22})$$

### 一次エネルギー構成の決定

一次エネルギーの構成は以下となる。

$$E_{1t} = D_{oil,t} + D_{gas,t} + D_{col,t} + D_{nuc,t} \quad (\text{A2.23})$$

$D_{oil,t}$  : 石油消費     $D_{gas,t}$  : 天然ガス消費

$D_{col,t}$  : 石炭消費     $D_{nuc,t}$  : 非化石燃料消費(原子力、地熱など)

一次エネルギーの供給の配分決定は、一次エネルギー供給のシェア・データから以下のよ

<sup>20</sup> マクロ生産関数  $X_t = f(L_t, K_t, E_{ft})$  を前提に、コスト関数を想定すると、最終エネルギー需要は、シェファードの補題から最適要素需要  $E_{ft} = g(X_t, w_t, P_{Kt}, P_{ft})$  が決まるというルートもある。

<sup>21</sup> 上の原油、天然ガスの記号と整合させてある。ただし、superscript の k は省略してある。

うに化石燃料消費が決定する<sup>22</sup>。

$$D_{oil,t} = s_{EOt} E_{1t} \quad (A2.24)$$

$$D_{col,t} = s_{ECt} E_{1t} \quad (A2.25)$$

$$D_{gas,t} = s_{EGt} E_{1t} \quad (A2.26)$$

$s_{EO}, s_{EG}, s_{EC}, s_{EN}$ : 各エネルギー源のシェア

ここでは残差として非化石燃料消費が決まることになっているが、非化石燃料が先に決まり石炭が残差としてもよい。シェアを決めるのに、2つの配分方式が区別される。

(a) 市場の相対価格

(b) 国のエネルギー政策

エネルギー形態の価格の違いが市場を通して配分を決めるのが第一の方式である。細目間の代替（シェア）は、各エネルギーの相対価格（対応する価格は各々  $PE_{Ot}$ 、 $PE_{Gt}$ 、 $PE_{Ct}$ 、 $PE_{Nt}$ ）よりなされる。また累積消費量、究極埋蔵量、税率（ $\tau_O, \tau_G, \tau_C$ ）などにも依存する（口述）。市場メカニズムによる決定では下の定式化をとる。

$$\log(s_{it}) = f \left\{ \log(s_{i,t-1}), \log \left( \frac{PE_{jt} PE_{kt}}{PE_{it}} \right) \right\} \quad (A2.27)$$

$$i = EO, EG, EC; j \neq i, k \neq i$$

## 二酸化炭素排出

化石燃料から二酸化炭素が排出される。

$$CO_{2,t} = R_O D_{oil,t} + R_G D_{gas,t} + R_C D_{col,t} \quad (A2.28)$$

$R_O, R_G, R_C$ : 排出原単位

$R_O$ =炭素 0.86 トン/トン  $R_G$ =炭素 0.62 トン/トン  $R_C$ =炭素 1.08 トン/トン

## 化石燃料国内価格

化石燃料の国内価格について、以下の3つの化石燃料の国内の価格形成を説明する。

$$PE_{Ot} = f_O(p_{oil,t}, e_t) \quad (A2.29)$$

$$PE_{Gt} = f_G(p_{oil,t}, e_t) \quad (A2.30)$$

$$PE_{Ct} = f_C(p_{col,t}, e_t) \quad (A2.31)$$

<sup>22</sup> この配分を司る箇所は、AHP モデルで決まるのでモデルでの必要性はない。また化石燃料と非化石燃料の比率のみを AHP で決め、化石燃料内部の比率を市場に委ねるという方式でも構わない。その場合、化石燃料内部の比率のみはモデルが説明する。

- $P_{oil,t}$  : 国際原油価格 (NY の WTI 等、ドル表示)  
 $P_{col,t}$  : 国際石炭価格 (オーストラリア等で形成、ドル表示)  
 $e_t$  : 為替レート (自国通貨/ドル)

ここに原油価格や石炭価格等が反映される。統合された一次エネルギー価格の定義と、それによる最終エネルギー価格の説明をおこなう。

$$P_{ft} = f(P_{1t}) \quad (\text{A2.32})$$

$$P_{1t} = s_{EOt} PE_{Ot} + s_{EGt} PE_{Gt} + s_{ECt} PE_{Ct} \quad \text{: 一次エネルギー価格を定義する式}$$

#### 炭素税の付加

最終エネルギー価格の形成は生産要素としてのエネルギーと資本の代替を喚起し、すなわちエネルギー価格の高騰は省エネ投資を促す。化石燃料に炭素税が課されると化石燃料の価格形成に影響し、価格式は以下のように変更を受ける。

$$PE_{Ot} = (1 + \tau_O) f_O(P_{oil,t} e_t) \quad (\text{A2.29})'$$

$$PE_{Gt} = (1 + \tau_G) f_G(P_{oil,t} e_t) \quad (\text{A2.30})'$$

$$PE_{Ct} = (1 + \tau_C) f_C(P_{coal,t} e_t) \quad (\text{A2.31})'$$

#### GDP デフレータの修正

マクロの GDP デフレータの形成に最終エネルギー価格が関与する。

$$P_t = f_0 + f_1 \left( \frac{w_t L_t}{X_t} \right) + f_2 P_{mt} + f_3 P_{ft} \quad (\text{A2.33})$$

$w_t$  : 賃金率

$L_t$  : 雇用者数

$X_t$  : 実質 GDP

$w_t L_t / X_t$  : 単位労働費用

$P_{mt}$  : 輸入物価

#### エネルギー指標

最後に、各種エネルギー関連指標の定義を述べる。エネルギー消費に関する 3 つの重要な比率を定義する。エネルギー炭素依存率  $\kappa_t$  は、一次エネルギー供給に対する二酸化炭素排出量の比率である。

$$\kappa_t = CO_{2,t} / E_{1t} \quad \text{: エネルギー炭素依存率} \quad (\text{A2.34})$$

$$CO_{2,t}^1 = CO_{2,t} / N_t \quad \text{: 人口 1 人当たり排出量} \quad (\text{A2.35})$$

$$e_{Et} = E_{ft} / X_t \quad (\text{A2.36})$$

$$e_{1t} = E_{ft} / E_{1t} : \text{一次エネルギー変換効率} \quad (\text{A2.37})$$

$$X_t^1 = X_t / N_t : \text{人口1人当り実質 GNP} \quad (\text{A2.38})$$

そうすると二酸化炭素の排出は以下のように分割される。

$$\begin{aligned} CO_{2,t} &= \left( \frac{CO_{2,t}}{E_{1t}} \right) \left( \frac{E_{1t}}{E_{ft}} \right) \left( \frac{E_{ft}}{X_t} \right) \left( \frac{X_t}{N_t} \right) N_t \\ &= \kappa_t \left( \frac{1}{e_{1t}} \right) e_{E_{1t}} X_t^1 N_t \end{aligned} \quad (\text{A2.39})$$

最後に、エネルギー関連を付加したマクロ・エネルギーモデルは、貿易と価格関係を通して多国間リンクが可能となる。ここでは詳述しない<sup>23</sup>。

### 補論3：マクロ・エネルギーモデルの2030年への目標追求

エネルギー関係のモデルの政策的応用では、エネルギー構成や二酸化炭素排出に用いられる。この点に関して経済産業省の有識者会議が2015年4月28日開かれ、総合資源エネルギー調査会（経産相の諮問機関）の「長期エネルギー需給見通し小委員会」に事務局案として提出された2030年の最適な電源構成は、原発比率を22~22%（大震災前の2010年度の依存度は28.6%、2013年度は1.0%、2013年9月からは全国で原発稼働ゼロ）、再生可能エネルギーを22~24%（内訳は太陽光が7.0%、風力が1.7%程度など）、LNG（液化天然ガス）比率は27%程度、石炭は26%程度、石油3%となっている。また構成と密接に関連する二酸化炭素排出量は2005年に比較して24%減の目標を設定している。目標数値の是非については議論があろうが、本稿はそれには触れず、それを実現するための将来の日本経済の姿を如何に描くかを探る。

こうした長期的課題の対処には、どの期間でモデル構造を捉えるかでアプローチが異なる。サンプル期間（モデル推定期間）の構造が2030年まで続くと仮定するアプローチに、最適手法を使った最適化政策がある。

#### a) 最適化政策

G.C.Chow(1975)が述べた議論の延長上にある。すなわちサンプル期間で推定されたモデル構造が将来まで不変であると想定し、2次損失型社会厚生関数の最適化を通して政策目標を実現する最適方策を議論する。筆者はその線に沿いつつ、多国間でゲーム論的に課題を捉えた。小坂(1994)では、最適制御に基づき問題を記述し、最適解を導いた。一方、T.Yano and H.Kosaka(2001)では、遺伝アルゴリズムから最適解を求めている。

#### b) ベイズ的頑強予測

計量経済モデルの予測シミュレーションは、近未来が基本であり、2030年とか2050年の

<sup>23</sup> 例えば、小坂(1994)等を参照。

予測をとまなうシミュレーションは、構造を捉える期間を、サンプル期間と同時に予測期間をも含めるべきではないかという批判があるだろう。この点に関しては、H.Kosaka(2013)で述べた考えに依拠し、2030年までの日本経済の姿を描く。ここでベイズ的というのは、尤度関数を取り上げて、推定と同時に将来値を決めることから来ている。

まず簡単な1本だけの方程式を前提に手法の骨子を述べる。連立体系での議論はここで差し控える。さて1980年～2014年がサンプル期間、2015年～2030年が予測期間とし、2030年までのベイズ的頑強予測の方式を、上の消費関数を例に述べる。消費関数の右辺の説明変数は既知としている。そこから消費の2015年以降2030年まで予測、外挿することを考える。以下で消費関数について頑強予測の方法を述べる。

### 消費関数の尤度関数

最尤法によりパラメータの推定を考える。そのため消費関数の尤度関数をとる。

$$L = \prod_{t=1980}^{2014} f(C_t, \mu_t, \sigma_1) \quad (\text{A3.1})$$

$C_t$  : 消費       $\mu_t$  : 消費の理論値       $\sigma_1^2$  : 消費の誤差の分散

消費の理論値は以下の単純な消費関数を仮定する。

$$\mu_t = \log C_t = a_0 + a_1 \log \left( \frac{Y_t}{p_t} \right) + a_2 \log C_{t-1} + u_{1t} \quad u_{1t} \sim N(0, \sigma_1^2) \quad (\text{A3.2})$$

(A3.1)のlog尤度を取り、消費の将来予測を考慮するための追加的項目を付加して、以下の拡張log尤度を考える。

$$\tilde{L} \propto -\frac{1}{(\sigma_1)^2} - \sum_{t \in T_0 \cup T_f} \frac{(\log C_t - \log \mu_t)^2}{2(\sigma_1)^2} - \frac{1}{2W(\sigma_1)^2} \sum_{t \in T_f} (\log C_t - \log C_t^*)^2 \quad (\text{A3.3})$$

$T_0 = (1980, 2014)$        $T_f = (2015, 2030)$        $W$  : 調整ウエイト

$C_t^*$  : 初期値は直線補間値 (後で更新される)、あるいは目標値

第1項は、消費関数のlog尤度からくるものであり、第2項は消費関数の関係から消費の将来値を予測するための項である。以下の手続きで消費のパラメータの推定と消費の将来予測を同時におこなう。

a) log尤度最大化で消費関数のパラメータを推定 (1980年～2030年)

パラメータで偏微分して未知パラメータを推定する。使われる最尤法は最小二乗法と同じなので回帰方程式を通して行う。

b) 将来年度の消費で偏微分 (2015年～2030年)



$$\frac{\partial \tilde{L}}{\partial C_t} = -\frac{1}{(\sigma_1)^2} (\log C_t - \log \mu_t) \left( \frac{1}{C_t} - \frac{\partial \log \mu_t}{\partial C_t} \right) - \frac{1}{W(\sigma_1)^2} (\log C_t - \log C_t^*) = 0 \quad (\text{A3.4})$$

したがって最適化条件を整理すると以下となる。

$$(\log C_t - \log \mu_t) \left( \frac{1}{C_t} - \frac{\partial \log \mu_t}{\partial C_t} \right) + \frac{1}{W} (\log C_t - \log C_t^*) \frac{1}{C_t} = 0 \quad (\text{A3.5})$$

$$(\log C_t - \log \mu_t) \left( 1 - \frac{C_t \partial \log \mu_t}{\partial C_t} \right) + \frac{1}{W} (\log C_t - \log C_t^*) = 0 \quad (\text{A3.6})$$

第2項が修正項である。ここで偏微分の評価は以下となる。

$$\frac{\partial \log \mu_t}{\partial C_t} = \frac{\partial \left( a_0 + a_1 \log \left( \frac{Y_t}{p_t} \right) + a_2 \log C_{t-1} \right)}{\partial C_t} = \frac{\partial (a_1 \log Y_t - a_1 \log p_t)}{\partial C_t} = \frac{a_1 \partial Y_t}{Y_t \partial C_t} - \frac{a_1 \partial p_t}{p_t \partial C_t} \quad (\text{A3.7})$$

$$\frac{C_t \partial \log \mu_t}{\partial C_t} = \frac{a_1 C_t \partial Y_t}{Y_t \partial C_t} - \frac{a_1 C_t \partial p_t}{p_t \partial C_t} = \frac{a_1 \partial \log Y_t}{\partial \log C_t} - \frac{a_1 \partial \log p_t}{\partial \log C_t} = a_1 \lambda_{YC} - a_1 \lambda_{pC} \quad (\text{A3.8})$$

上の2つの弾力性はサンプル期間データの平均で与えることとする。

$$(\log C_t - \log \mu_t) (1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC}) + \frac{1}{W} (\log C_t - \log C_t^*) = 0 \quad (\text{A3.9})$$

したがって以下を得る。詳しい式の変形も記してある。

$$(\log C_t - \log \mu_t) = -\frac{1}{W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC})} (\log C_t - \log C_t^*) \quad (\text{A3.10})$$

$$\left( 1 + \frac{1}{W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC})} \right) \log C_t = \log \mu_t + \frac{1}{W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC})} \log C_t^* \quad (\text{A3.11})$$

$$(1 + W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC})) \log C_t = W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC}) \log \mu_t + \log C_t^* \quad (\text{A3.11})$$

最終的に、以下の消費の予測式を得る。

$$\log C_t = \frac{W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC})}{(1 + W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC}))} \log \mu_t + \frac{1}{(1 + W(1 - a_1 \lambda_{YC} + a_1 \lambda_{pC}))} \log C_t^* \quad (\text{A3.12})$$

上式の意味するところは、新たな消費の値  $\log C_t$  は、消費の理論値  $\log \mu_t$  と前の値  $\log C_t^*$  の

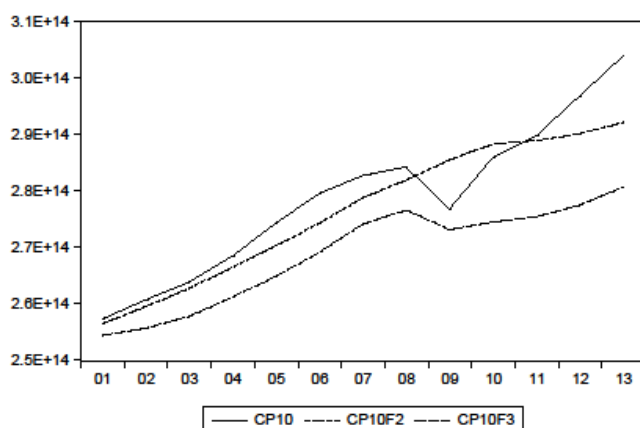
加重平均をとることである。 $C_t^*$  に新たな  $C$  の値をいれて、上のプロセスを繰り返す。ここ

で  $C_t^*$  には将来の特定時点の目標値を入れる。消費以外の変数も同様に頑強予測をし、同時

決定で処理をおこなう。以上が頑強予測の方法である。

さて次に簡単な数値例として日本経済の消費関数を取り上げる。1980年～2013年まで年次のサンプルであるが、1980年～2000年が仮のサンプル期間、2001年～2013年が将来予測期間とする。2009年にはリーマンショックで消費が低下しているのを、高めの目標値をいれて処理している。結果を示すと、cp10が現実値（上下変動を示す値）、cp10f2が政策を込めた予測値（中央値）、cp10f3（最下段）が通常の予測値<sup>24</sup>である。政策を込めた予測が現実を追っているのが分かる。

補図1：現実値・政策的予測値・単純予測値



頑強予測は全ての内生変数に政策目標値を与えることが望ましいが、1個でも可能である。政策の対象にならない残りの変数はモデルを単純に解く。政策の対象となる内生変数は、先に述べたように、例えば、二酸化炭素排出量であったり、インフレターゲットでの物価であったりと多様である。

#### 補論4：AHPモデルとエネルギー種別の配分

各国のエネルギー源である、石油、天然ガス、原子力、石炭の依存への構成比については、各国の構成比は異なっているし、時系列的にも変化している。日本は、3.11以前では石油と原子力に依存し、天然ガスが増生していた。しかし3.11以降は原子力が頓挫し、現在模索中で天然ガスに依存が暫定的に高まっていて、貿易収支の赤字化の原因とされている。中国は石炭の比率が現状では高いが、環境汚染で石炭は長期的に比率が弱まってゆくだろう。こうした構成比の違いの背景には、各国の安全に対する考えの違い、二酸化炭素排出への配慮、コスト等が関与していると思われる。エネルギー源への国民意識の差が、構成比を生み出しているものと思われる。構成比の構成は、市場原理というよりもエネルギー

<sup>24</sup> 説明変数の2001年～2013年の値を入れて、消費を予測するものである。cp10f2においても政策を反映した目標値を入れなければ、cp10f3に一致する。政策を反映するとは、二酸化炭素削減を意図するシナリオを描くとか、インフレ目標2%を目標とすることを指す。

をめぐる国策が反映されているものとしてみるのが自然である。

そのための分析のフレームワークを述べるのが本補論の目的である。階層分析法は、意思決定における問題の分析における人間の主観的判断をシステムアプローチから決定する意思決定手法と言われている。AHP (Analytic Hierarchy Process) と呼ばれ、ピッツバーグ大学の Thomas L. Saaty が提唱したのが始まりである。階層分析法の主なプロセスとして、「階層構造の構築」、「一対比較」、「ウェイトの計算」、「総合評価値の計算」というプロセスをへて対象の数値による順序付けが得られる。

以下で 4 つの評価基準を背景として、4 つのエネルギー源が如何に選択されるのかを AHP 分析を使って例示しよう。その分析で一対比較が使われる。4 つの評価基準として、安全性、二酸化炭素排出、コスト、アクセスを、4 つのエネルギー源として石油、原子力、天然ガス、石炭を取り上げる。

2 つの対象の比較（一対比較という）について、以下のように数値を与えるルールを設定する。

補表 2：一対比較値

一対比較値	意味
1	両者の項目が同じくらい重要
3	前の項目の方が後のほうより若干重要
5	前の項目の方が後のほうより重要
7	前の項目の方が後のほうよりかなり重要
9	前の項目の方が後のほうより絶対的に重要
2、4、6、8	補完的に用いる
上の数値の逆数	後の項目から前の項目をみた場合に用いる

日本の 3.11 以前を念頭に、一対比較を通して、4 つの評価基準を相対評価を与える。補表 3 は評価基準自体の相対評価を示す。二酸化炭素の排出基準では、左の二酸化炭素排出基準と右の基準は同じなので、(1,1)のマスに 1 と入れる。二酸化炭素排出基準と安全性基準では、前の項目の方が後のほうより絶対的に重要であるとして、(1,2)のマスに 9 が入る。以下、同様にマスを埋める。右三角行列の数値を埋め、左三角行列は数値の逆数を入れる。9 の場合は 1/9 となる。全体のマスを埋めたものが表 2 である。ただしこれは仮説的数値で現実を反映している訳ではない。右の列に左の幾何平均をとり、幾何平均の和で割ったものをウェイト列に記してある。ウェイトの意味するところは、評価基準自体の相対評価となる。二酸化炭素排出とコストが大半を占める。

補表 3：評価基準の一対比較評価

対	二酸化炭素	安全	コスト	アクセス	幾何平均	ウェイト
二酸化炭素	1	9	1	9	3	$3 / 6.70 = 0.448$
安全	1/9	1	1/7	9	0.59	$0.59 / 6.70 = 0.088$

コスト	1	7	1	9	2.91	$2.91 / 6.70 = 0.434$
アクセス	1/9	1/9	1/9	1	0.20	$0.2 / 6.70 = 0.030$

つぎに二酸化炭素排出基準にてらして、エネルギー源の一对比較評価をおこなったものが、補表 4 である。幾何平均と最後のウエイトも補表 3 と同様である。

補表 4 : 「二酸化炭素排出」に対するエネルギー源の一对比較評価

二酸化炭素	原子力	天然ガス	石油	石炭	幾何平均	ウエイト
原子力	1	7	1/5	3	1.43	$1.43 / 6.33 = 0.226$
天然ガス	1/7	1	1/9	1/6	0.23	$0.23 / 6.33 = 0.036$
石油	5	9	1	5	3.87	$3.87 / 6.33 = 0.611$
石炭	1/3	6	1/5	1	0.80	$0.8 / 6.33 = 0.126$

さらに安全性基準にてらして、エネルギー源の一对比較評価をおこなったものが、補表 5 である。

補表 5 : 「安全性」に対するエネルギー源の一对比較評価

安全性	原子力	天然ガス	石油	石炭	幾何平均	ウエイト
原子力	1	1/7	5	1	0.92	$0.92 / 6.68 = 0.138$
天然ガス	7	1	9	7	4.58	$4.58 / 6.68 = 0.686$
石油	1/5	1/9	1	1/5	0.26	$0.26 / 6.68 = 0.039$
石炭	1	1/7	5	1	0.92	$0.92 / 6.68 = 0.138$

さらにコスト基準にてらして、エネルギー源の一对比較評価をおこなったものが、補表 6 である。

補表 6 : コストに対するエネルギー源の一对比較評価

コスト	原子力	天然ガス	石油	石炭	幾何平均	ウエイト
原子力	1	6	1/5	3	1.38	$1.38 / 6.3 = 0.219$
天然ガス	1/6	1	1/9	5	0.55	$0.55 / 6.3 = 0.087$
石油	5	9	1	6	4.05	$4.05 / 6.3 = 0.643$
石炭	1/3	1/5	1/6	1	0.32	$0.32 / 6.3 = 0.051$

最後にアクセス基準にてらして、エネルギー源の一对比較評価をおこなったものが、補表 7 である。

補表 7 : 「アクセス」に対するエネルギー源の一对比較評価

アクセス	原子力	天然ガス	石油	石炭	幾何平均	ウエイト
原子力	1	1/7	3	1/6	0.52	$0.52 / 6.3 = 0.083$
天然ガス	7	1	6	1/3	1.93	$1.93 / 6.3 = 0.306$

石油	1/3	1/6	1	1/9	0.28	$0.28 / 6.3 = 0.044$
石炭	6	3	9	1	3.57	$3.57 / 6.3 = 0.567$

以上の5組の一対比較表から集計をおこなう。補表8の一番上の行は補表2の評価基準の一対比較から相対評価の数値が並べられている。またその下の列1には補表4のウエイト、列2には補表5の安全性のウエイト、列3には補表6のコストのウエイト、列4には補表7のアクセスのウエイトが並べられている。

補表8：集計表

	二酸化炭素 (0.45)	安全性 (0.09)	コスト (0.43)	アクセス (0.03)
原子力	0.226	0.138	0.219	0.083
天然ガス	0.036	0.686	0.087	0.306
石油	0.611	0.039	0.643	0.044
石炭	0.013	0.138	0.051	0.567

最後に、補表8の集計表から各々のマスの数値に、上の判断基準の相対評価のウエイトの数値を掛けて和をつくと、補表9となり、補表9の総合得点がエネルギー源の総合評価の数値となる。

補表9：総合得点

	二酸化炭素	安全性	コスト	アクセス	総合得点
原子力	0.102	0.012	0.094	0.002	0.21
天然ガス	0.016	0.062	0.037	0.009	0.124
石油	0.275	0.004	0.276	0.001	0.556
石炭	0.057	0.012	0.022	0.017	0.11

以上の結果より、石油、原子力、天然ガス、石炭の順のウエイト評価を得た。以上は例示するための仮説的数値を用いたものであり、現実には一対比較には現実を反映する必要がある。

日本では、3.11以前と以降では、原子力の安全性への評価が変化してきている。事故はイタリアにも影響を与えた。同様に、ドイツでもチェルノブイリ事故以降では原子力への志向が変化した。また中国はエネルギー源へのコスト志向から石炭が選択されてきたが、環境汚染の観点から二酸化炭素排出の少ないエネルギー源への移行が図られるものと思われる。そうした変化は、評価基準の変化を通して、エネルギー源への比率の変化へと繋がるものと思われる。こうした分析装置を使うことにより、エネルギー源の比率に関するシミュレーションを行うことが可能となる。

そこでは当然のことながら評価基準は4つ以外でも構わないし、評価対象のエネルギー源は4以外の多数でも構わない。それはたとえば、新しいエネルギー源であるメタンハイドレードの出現への評価にも繋がる。

### 補論 5 : 合理的期待形成の処理

式(2.7)~式(2.10)を取り出す。そして各々期待値をとる。

$$E(X_{oil,t}) + \delta_{12}E(p_{oil,t}) + \gamma_{11}gdp\gamma_t + \gamma_{14}z_t = 0 \quad (A4.1)$$

$$E(X_{oil,t}) + \delta_{22}p_{oil,t}^e + \delta_{23}E(X_{gas,t}) + \gamma_{22}\tilde{p}_{oil,t} + \gamma_{24}z_t = 0 \quad (A4.2)$$

$$E(X_{gas,t}) + \delta_{34}E(p_{gas,t}) + \gamma_{31}gdp\gamma_t + \gamma_{34}z_t = 0 \quad (A4.3)$$

$$\delta_{41}E(X_{oil,t}) + E(X_{gas,t}) + \delta_{44}p_{gas,t}^e + \gamma_{43}\tilde{p}_{gas,t} + \gamma_{44}z_t = 0 \quad (A4.4)$$

上の式は確定的であり、確率変数は含まれない。ここで、 $p_{oil,t}^e = E(p_{oil,t})$  ,  $p_{gas,t}^e = E(p_{gas,t})$  とおいて4つの未知変数 ( $E(X_{oil,t}), E(p_{oil,t}), E(X_{gas,t}), E(p_{gas,t})$ ) について得くと以下の方程式が得られる。

$$p_{oil,t}^e = g_{oil}(gdp\gamma_t, \tilde{p}_{oil,t}, \tilde{p}_{gas,t}, z_t) \quad (A4.5)$$

$$p_{gas,t}^e = g_{gas}(gdp\gamma_t, \tilde{p}_{oil,t}, \tilde{p}_{gas,t}, z_t) \quad (A4.6)$$

これらの関係を、再度、元の式(2.8)と式(2.10)に各々代入して、4つの未知変数 ( $X_{oil,t}, p_{oil,t}, X_{gas,t}, p_{gas,t}$ ) について解くと合理的期待形成を採用した解となる。