

2008年度大東文化大学経済研究所 経済シンポジウム 2008/11/28

マルチエージェントシステム： 東アジア各国のエネルギー利活用と経済負荷

東京大学・大学院工学系研究科・システム創成学専攻（旧地球システム工学専攻）

松 尾 誠 治

1. はじめに

化石燃料を利用したエネルギーの大量消費は経済の急激な発展をもたらしたが、その一方で人口の急激な増加、特に発展途上国での爆発的な人口増加という問題が生じた。今後、これら途上国が先進国並みの経済成長を達成すると、エネルギー消費が今のおよそ4倍となり、たとえ徹底した省エネルギーを実施したとしても世界のエネルギー消費は現在の2倍程度になると予想されている^[1]。また、化石燃料に依存した近代社会は、酸性雨、オゾン層の破壊、地球温暖化などの地球規模の環境悪化を引き起こしその問題が益々深刻化している。経済発展と資源・エネルギーそして環境との三者が相互に影響し合う環境は「トリレンマ問題」と呼ばれ、同時に達成することが困難な問題と考えられている（図1）。互いに複雑な要素が絡み合ったこれらの問題解決には、もはや個別に問題を検討していたのでは本質的な解決は望めず、システム論を重視した新たな枠組みの設計が求められる。その有効な手段の一つに、マルチエージェントシステムを指向したモデル化が挙げられる。ここでは、マルチエージェントシステムの原理、およびその事例を幾つか紹介し、さらに、アジアエネルギーに関する問題、特に非在来エネルギーの利活用に対するマルチエージェントシステムを用いたモデル化について述べる。

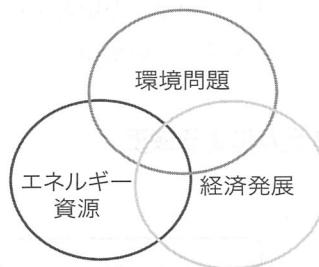


図1 トリレンマ問題

2. マルチエージェントシステム

2.1 システム論について

マルチエージェントシステムについての説明をする前に、「システム理論」について若干触れておく。「システム」という言葉は、近年工学のみならず経済学など多分野においても使われる

ようになってきた。この言葉の定義には多様な解釈があり一般化表現することが難しいが、ここでは、『人間も含めて、システムを総合的に把握し科学的に分析し、一つの目的を達成するためには相互に関連する構成要素をいかにうまく選択および結合し最適な制御を実現すればよいかを決定する創造的思考活動。』という表現がこの分野では適當ではないかと考える。

2.2 複雑系社会システム

前述したトリレンマ問題は、その対象が自然科学のみならず人間の行動そのものであったり、個々の対象がそれぞれ自律し互いに協調や対立するなど、いわゆる「複雑系社会システム」としての特徴を有している。このような問題に対し、従来最適化問題、すなわち、対象の定式化あるいはモデル化し与えられた条件の下で最良な解を求める方法が適用されていた。しかし、問題の複雑化に伴う計算量の爆発や探索空間の拡大による最適解の探索の困難さが生じ、そのため、ヒューリスティック探索、メタヒューリスティック探索、さらに、突然変異や自然淘汰など生物の進化アルゴリズムを取り入れた進化的計算などの最適解をもとめる工夫がなされている^[2]。しかしながら、この種の問題で扱われる対象には、特出すべき二つの点がある。一つは、「人間は目的関数を最大にする最大化行動をとるのではなく、環境の兆候から特定の反応を行う」という「限定合理性」を包含していることである^[3]。人間の能力は対象や問題が複雑になってくると、おのずと入手可能な情報量は局所的なものに限られたり、得られた情報の処理には限界があったり外部への働きかけ、つまり操作可能なものに限度があるなどの種々の制約を受ける。そのため、全体の最大化は実質的には不可能（解析の意味）で、その解決方法そのものがもはや意味がないという考え方である。もう一つは、要素還元主義の否定、すなわち「どのような自然現象もその検定には単純な動作原理があり、それらの単純な動作原理を解明すればあらゆる自然現象は解明できる」という従来の科学的方法論からの脱却である。社会システムは単純化された部分の集合体と単に考えるのではなく、「複雑なものを細分化することなく複雑なまま扱うことにより、系の構成要素とそれらの相互作用が系全体にどのような影響を及ぼすかを明らかにしようとする全体を統一的に把握する全体主義へのパラダイムへの変換」が求められている^[4]。

2.3 マルチエージェントシステムによる接近

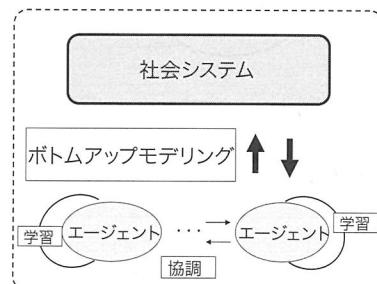


図2 マルチエージェントシステム

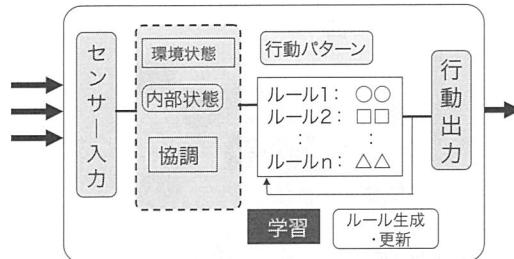


図3 エージェントの構造

上記要求に応える解決法の一つにマルチエージェントシステムによるアプローチがある。マルチエージェントシステムとは、「自律した個々の主体が多数集まって相互に依存し合っているシステム」をいう^[4]。この設計では、図2に示すように従来のトップダウン的なシステム設計法とは異なり多数の自律した主体からボトムアップ的に組み合わさることで全体システムが構成されていく。ここでいうエージェントとは、「環境の状態を知覚し、自らの知覚と行動を介して環境と相互作用する自律的な主体」を示し、その主体には人間や企業や政府などの一つの固体が想定される。また、自律的であるということは、自身の経験とそれが働く環境に組み込まれた知識の両方に基づいて行動できることを示す。各エージェントは、限定された知覚能力のために社会全体やほかのエージェント状況はわからない。エージェント間の相互作用を含めたルールを設計するには、例えば入力情報を基にした行動テーブルを遺伝子型に表現した遺伝的アルゴリズム(GA)を用いることでエージェントを学習させ、マクロ的な振る舞いを進化的に決定する手法がとられる(図3)。

3. マルチエージェントシステムを用いたシミュレーションの事例

このシステムを用いたシミュレーションは、エージェントの記憶・学習の機能が重要な役割を果たす対象システムの解析に威力を発揮する^[5]。代表的な例としては、個々の人種差別がさほど強くなくても地域社会が画然と分かれる分居現象のモデル化や、砂糖の山が並ぶ中をアリが砂糖を求めて動きまわり、一部が餌に群がることによる仲間の餓死を防ぐような協調行動を模索する「シュガースケープ・モデル」などがある。ここでは、「シュガースケープ・モデル」、近年解析の成果が著しい「交通渋滞モデル」^[7]、そして、「集合の要素である人間の精神の一つ一つが相互作用しその集合全体の上で形成されるもの」と定義される「世論形成モデル」^[8]について以下の概要に触れる。

3.1 シュガースケープモデル^[6]

「シュガースケープモデル」は、もともと人口社会「育成」のための環境として Epstein と Axtell が開発したソフトウェアで、図4に示すようにアリが砂糖を求めて動きまわり餌を捉える生物個体群の動態をシミュレートしたモデルである。

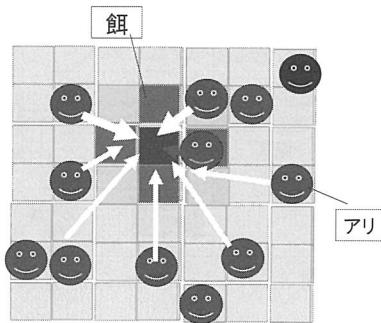


図4 シュガースケープモデル

ここでは、黄色の濃淡が砂糖の量を表わし砂糖は消費されると0になるが、指定された「再生度」に従い一定の間隔で各地点の限界値まで補充される。一方、アリの状態は、「視野」「食欲」「財産」という三つの値で指定され、アリはその「視野」に従って移動し、移動先で採取した砂糖を「食欲」の分だけ消費、残りは「財産」に加えられる。各ステップにおけるアリの行動ルールを簡単にまとめると以下のようになる。

- ・アリの状態は「視野」「食欲」「財産」という三つの値で指定する。
- ・シュガースケープを見渡し、「視野」に入る地点のうち最も砂糖が多い場所に移動する。
- ・移動先で砂糖を採取し「財産」に追加。「財産」から「食欲」の分だけ砂糖を消費する。
- ・「財産」が「食欲」の10倍を越えると、子アリを生成。その属性はランダムに決定する。
- ・「財産」が0を切ると餓死する。

シミュレーションでは、砂糖の湧き出す場所は狭く限られている。そのため、複数のエージェントがそこへ殺到すると、デットロック状態になって砂糖の寡占状態が発生し砂糖にたどり着けない大多数のエージェントは死んでしまう。すなわち、各エージェントが、利己的に振舞うと全体の利益を最適化することができない。多数のエージェントが生き残れるように社会全体がうまくやっていくためには、各エージェントが社会全体のことを考え砂糖を分かち合いながら行動すればよいが、各エージェントは限定された知覚能力のためこれらの状況は分からず。マルチエージェントシステムの設計では、多数のエージェントを他との相互作用を含めてどう設計していくかが最終的に問題となり、センサー入力から適切に行動を決定する意思決定システムを構築する必要が生じる^[5]。一般に、これを手作業で行うには、設計者がまず問題に対し最初のエージェント設計を行い、その後少しづつまたは大胆にエージェントの意志決定システムを変更し、変更点の取捨選択を繰り返し望む設計に近づける地道な作業が必要となる。このような場合、エージェントの意思決定に遺伝子型を用いて表現する「遺伝的アルゴリズム」を用いたシステムを設計することは有効な手法である。この方法では、入力情報として与えられるもの（砂糖の保有量、能力、位置など）と、その出力行動パターン（上下左右の移動）を、それぞれ0、1の4ビットで表す。次に、初期のエージェントを複数発生させシミュレーションを実施し、条件に適合したエージェ

ントに交差、一様交差、突然交差を行い世代を進めることで、最終的に多くのエージェントが生き残る理想的な社会をシミュレートする。これにより、ミクロな視点しかもたないエージェントのマクロな振る舞いを進化的に作り上げていくことが可能となる。

入力情報				行動出力				
•A: 産出量 •B: 位置 •C: 仲間の位置 •D: 餌の量				  <ul style="list-style-type: none"> ・あ: 前進 ・い: 後退 ・う: 右 ・え: 左 ・お: 餌をとる 				
<入力情報パターン>				<行動テーブル>				
A	B	C	D	E ..	あ	い	う	え お
001	010	011	000	100	1	0	0	0 0
101	001	010	010	110	0	0	1	0 0
011	011	011	011	101	0	0	0	1 0
:	:	:	:	:	:	:	:	:

図5 エージェント行動を表すテーブル

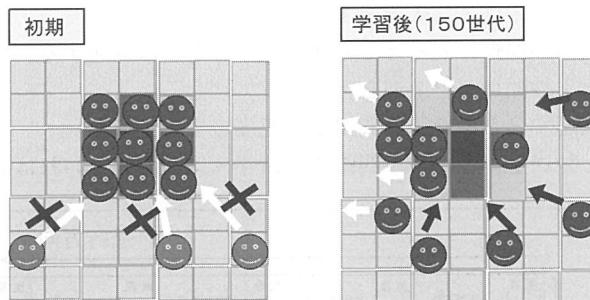


図6 GAによる学習結果（初期、学習後）

3.2 車の渋滞モデル^[7]

車の渋滞現象などのメカニズムの解明は、古くは寺田寅彦氏の隨筆や工学的見地から待ち行列理論などが知られているが、実際の現象はサグ渋滞（サグは窪地のことだが、登り坂や下り坂に気づかず速度低下する場所）など単に量的な問題では説明できない。実際道路上では、一台の車はある地点を目的地として進みながら信号機や交通標識、そして周囲の車の動きに従う。多数の車の流れを見たときは、一台の車とは異なりそれらは集団として振舞う。このように、多数の要素からなり局所的な相互作用によって全体としては複雑に振舞う交通流システムの現象の解明に、マルチエージェントシステムは有効な手法であると考えられる。

交通流をマルチエージェントとしてモデル化する際に車をエージェントとするシステムを考える。車エージェントには、座標、速度、加速度、車種、可視範囲、目的地などを入力情報、そしてその出力行動にアクセル・ブレーキの状態を考慮することでそれぞれの車に特徴を持たせることができる（図7）。例えば、車に速度や車線変更を実装することで、低速で進む車、車線変更

を行いながら高速で進む車が表現される。また、交差点で他のエージェントを確認し状況によつては道を譲るといった行動も起こすことができる。各ステップにおける車エージェントの行動ルールは以下のような表現が可能である。

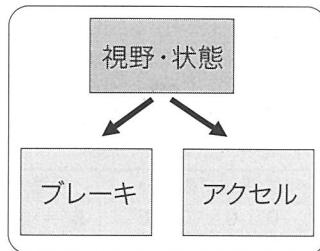


図7 車のエージェントモデル

- ・一直線の道路を車が等間隔で走っている。
- ・車は通常1秒間にnマス進む。
- ・車は車間距離がmマス以下だと減速する。
- ・道路の途中で何かが視野に入るとその横を通るとき車は減速する。
- ・車は減速すると1秒間にkマス進む。
- ・車はいったん減速すると最低T秒間はその速度のままである。
- ・減速してからx秒以上経過し、車間距離がmマス以上開いていれば通常速度に戻る。

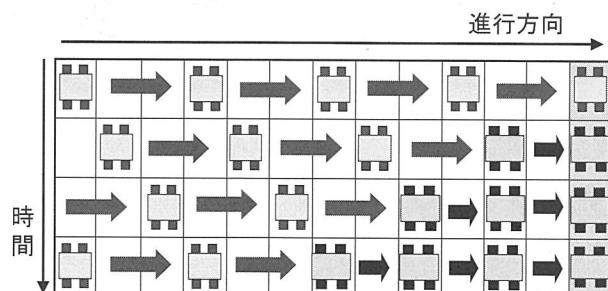


図8 淀滞現象のシミュレーション

このような設定を行えば、ドライバーの視野に何かが入った場合に車間距離が時間の経過とともに徐々に縮まる、いわゆる「わき見渋滞」のメカニズムが再現できる（図8）。さらに、交差点やそれに付属する信号機などをエージェントとみなしある交差点間で通信を行い、交通流を円滑にする方法も検討されている。車エージェントは交差点エージェントに自分の目的地を情報として送信し、交差点エージェントからその交差点を通過する予定の車エージェントの総数を情報として受信する。交差点エージェントはその交差点を通過しようとする車エージェントの台数などの情報を互いに交換し合い、車を円滑に流す。また、車エージェントと交差点エージェント間で

通信を行い、目的地まで最短時間で到達できるルートの検索結果を受信するといった未来の交通流システムの設計が挙げられる。

3.3 世論形成のマルチエージェントモデル^[7]

世論とは人々の中から発生する共通意見であるが、「集合の要素である人間の精神の一つ一つが相互作用してその集合全体の上で形成されるもの」と定義できる。世論は当該問題に対する個人の意見ばかりでなく、人間相互のコミュニケーションやマスメディアの影響を受けると考えられ、単に個人の意見の集積ではとらえきれない。世論形成の動態とその形成メカニズムを解明することは、不公正な世論操作を防止したり効率的な合意形成を促すために不可欠であり社会的意義も大きい。世論形成のように、要素の振舞いが他の要素にとっての環境を形成し、それが再び要素の振舞いに影響を与えるような系の振舞いの予測には、従来のマクロ的支配方程式を基礎とするアプローチよりもマルチエージェントシミュレーションが適していると考えられる。世論形成のモデル化は以下のとおりである。

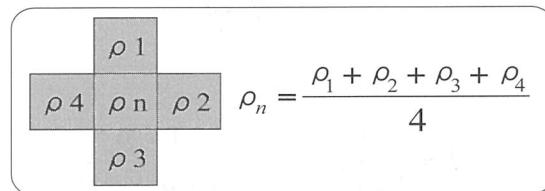


図9 世論形成モデル

各エージェントは、ある主張に対し賛成あるいは反対の立場を有する個人を表し、社会はこのようなエージェントを2次元正方格子に多数配置した領域と考える。各エージェントは上下左右の近傍エージェントと結合を持ち、互いに影響を及ぼしあう。これは社会において個人は空間的に近接する人と接触の機会が多く、そうした地縁的な近接相互作用を第一に考慮したためである。また、シミュレーション結果を2次元マップで表示することで、全体像を把握することが容易であるという利点をもつ。なお、正方格子の外周には周期境界条件を適用している。

モデル化の際の意思決定機構に関しては、ある主張に対してエージェントが賛成する確率 p_i とし、これをエージェントの意見と呼ぶ。エージェントは現在の自分自身の意見、および結合を有する他エージェントの意見に基づいて意見を修正する。

$$\frac{dp_i}{dt} = w_1 E + w_2 I \quad \cdots (1)$$

ある主張に対してエージェント i が賛成する確率を p_i とし、これをエージェント i の意見と呼ぶ。ここで、 E は他者の意見に同調しようとする効果「公的自己意識」で、 I は自己の意見の確信を高めて心的安定状態を求めようとする効果「私的自己意識」を示す。 w_i は両効果の大きさを決める重み係数 ($w_1+w_2=1$) である。

「公的自己意識」 E については、以下の式で定義される。

$$E = w_3(p_n - p_i) + w_4(p_m - p_i) \quad \cdots (2)$$

ここで、 P_n はこのエージェントが結合を有する近傍エージェントの意見の平均値、 P_m はマスメディアが流す意見を示す。この場合、マスメディアの影響がない場合に格子間隔をゼロに漸近させた極限において、上式は反応拡散方程式となる。マスメディアが流す意見は、社会における意見分布の何らかの反映であると考えられる。ここでは、社会全体の平均的な意見を反映した報道を行うような中庸なマスメディアを想定し、その特性を以下のような関数でモデル化する。ここでは、 P_{ave} は社会全体における意見の平均値である。この関数は意見が拮抗しているときに最も変化しやすく、意見分布が賛成・反対どちらかに偏ると飽和して行く傾向を示す。

$$P_m = \frac{1}{1 + e^{k_2(0.5 - P_{ave})}} \quad \cdots (3)$$

$$P_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad \cdots (4)$$

一方、「私的自己意識」 I は次式で定義される。

$$I = \frac{1 - p_i}{1 + e^{k_1(1 - 2p_i)}} - \frac{1 - p_i}{1 + e^{k_1(2p_n - 1)}} \quad \cdots (5)$$

私的自己意識は個人の潔癖性や性急さを表すモデルパラメータで、これが大きいほど心理的に曖昧な状態を嫌う傾向を示す。この関数は非線形な関数であり、係数の値のとり方により負のフィードバックや正のフィードバックをもたらし、自分の意見を確信的な方向へ、すなわち完全に反対か完全に賛成の近傍状態へ導く働きをする。

このシミュレーションにより得られる結果は図 10 のように示される。この場合、 p_i の値がある閾値以上になるエージェントを賛成と考えることで、各要因に対する意見の分布がシミュレートできる。

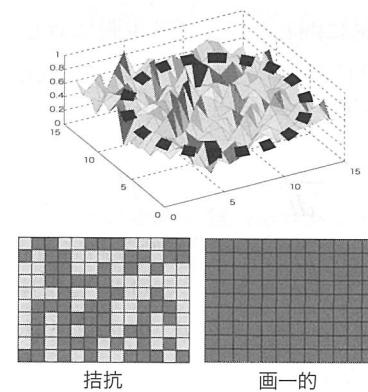


図 10 世論形成モデルシミュレーション結果

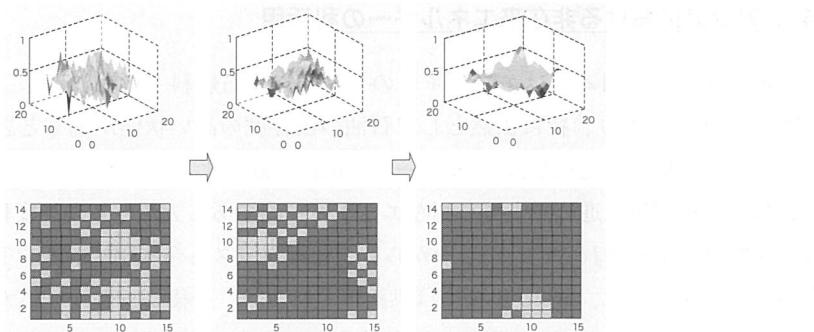


図 11 w_1 「公的自己意識」 $\gg w_2$ 「私的自己意識」

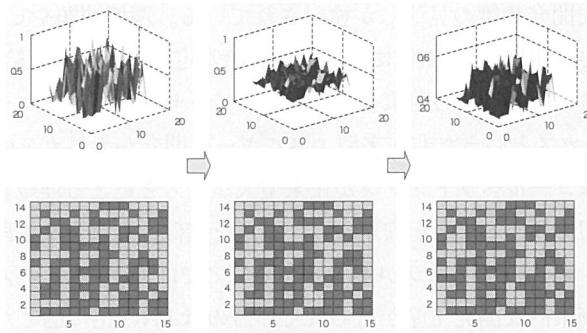


図 12 w_2 「私的自己意識」 $\gg w_1$ 「公的自己意識」

例えば w_1 「公的自己意識」が w_2 「私的自己意識」より強い場合は、図 11 に示すように時間の経過に伴い意見が画一化され、逆に、 w_2 「私的自己意識」が w_1 「公的自己意識」より強い場合は、図 12 に示すように時間の経過を経ても意見が拮抗し続ける。その他、主な結果をまとめると以下のようなになる。

- ・周囲への同調と同時に、自己の意見を確信的なものにして心理的安定を得ようとする私的自己意識が働くことで始めてコミュニティが形成される。
- ・世論のクラスターが決定される場合、空間距離の近さによる接触機会が決定要因となる。
- ・意見集約型のマスコミは世論を偏った方向に誘導する危険性がある。
- ・選好の二極分化がコミュニティを形成する。
- ・コミュニティの規模は公的意識が高く自己意識が弱いほど大きくなる。

4. アジアエネルギー問題へのマルチエージェントシステムの適用

前述したトリレンマ問題のうち、ここでは回避困難な制約が多いエネルギー需給、特にアジアエネルギー問題に対するマルチエージェントシステムのシミュレーションモデルの設計について触れる。

4.1 アジアにおける非在来エネルギーの利活用

資源少国である日本ではエネルギーの8割強を化石燃料（石油 47%、天然ガス 13%、石炭 24%）で賄っており、特に依然として石油の依存度の高い状態が続くと思われる^[9]。この脆弱なエネルギー構造を是正し、エネルギー安定供給を確保することがエネルギー政策の基本である。今後は、環境対策を進める上で有利なエネルギー源である天然ガスの高度利用が益々推進されることが容易に予測される。しかしながら、その天然ガスも今後中国、インド等が大口の輸入国となることが予測され、2030年頃には供給不足が生じ、今後は安価な天然ガスを安定的に確保すること難しい状況である。中国では資源外交が戦略的に推し進められ、加えて国産天然ガスの増産に向けた急速な動きが見られ、他方、LNG 供給国であるインドネシアなどでは、国産 LNG の国内有効利用も含めた開発政策の見直しが検討されている。環境問題やピークオイル問題から、在来型天然ガスの需要が伸びる中、如何にして長期需給安定を図るかが供給国、需要国双方にとっての喫緊の課題となっている。その対策としては、タイトサンドガス・コールベッドメタン（以後、CBM）・シェールガスといった非在来型エネルギーの開発が天然ガスの延命を図る鍵となるが、特に、アジアにはコールベッドメタンが在来型天然ガスを越える埋蔵量をもつことから、今後これらの開発を適切に進めることが安定なガス資源を確保する有力な手段となると考える。

一方、パイプライン輸送のインフラが不十分なアジアでは現在 LNG が天然ガスの唯一の輸送形態となっており、商業的な開発生産が行われているのは LNG 化に適した大規模ガス田に限られ、中小規模の海洋天然ガス田は未開発のまま放置されている。その場合も、CBM など中小規模の非在来型天然ガス田のガスをジメチルエーテル (DME) やメタノール、フィッシャー・トロプシュ (FT) 合成油等の GTL (Gas To Liquid) に転換したり、またこれらガス田からの天然ガスをハイドレート NGH 化 (NGH: Natural Gas Hydrate) して輸送する方法の商業化が問われている。したがって、これら「非在来型エネルギー」の利用拡大は今後益々重要度が増してきており、その場合どの方式がどのような条件下で市場に受け入れられるのか、放置されている未利用エネルギー資源の利活用や地球環境保護の条件を満足する様々なファクターの影響を考慮し、その最適な設計を実施しなければならない。

4.2 マルチエージェントシステムを用いた設計手法

マルチエージェントシステムを用いた設計は以下の手順にしたがう。アジア諸国における中小規模ガス田および非在来型エネルギーの生産に対する有効な商取引シナリオを提案し、それを実現可能とする戦略をマルチ・エージェント人工市場モデルを用い解析する。

- 1) アジアにおける非在来型天然ガスの有効な利用スキームの提案
- 2) マルチエージェント人工市場シミュレーターの構築
- 3) アジア諸国的重要個別シナリオの提案およびその解析

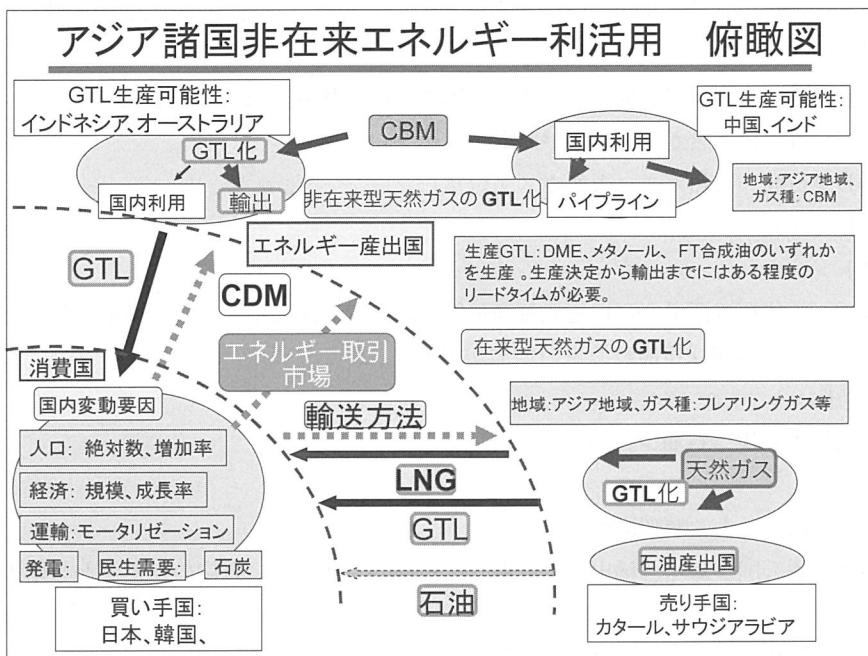


図 13 アジア諸国非在来型天然ガス有効利用俯瞰図

図 13 は、今回提案したアジア諸国におけるエネルギー産出国および消費国の非在来型天然ガスの有効利用俯瞰図を示す。ここでは、インドネシア、オーストラリアなどの産油国は CBM を国内利用または輸出し、中国、インドなどは国内利用にとどめることを前提としている。一方、サウジアラビア、カタール等の産出国では天然ガスの GTL、NGH 化を想定することとした。この俯瞰図に基づき個々のエージェントならびにエネルギー人工取引市場を構築する。環境状況を知覚し行動する売り手国・買い手国など、自律的な主体を備えた複数のエージェントが集合的に相互作用を繰り返すこれらのプログラミングには、ボトムアップ型のマルチエージェントシミュレーター (MAS) を用いた。記憶・自律的学習、ルール更新を重視した個々のエージェントの設計には遺伝的アルゴリズムを用いることとした。

4.3 具体的検討事項

<輸入国>

- ・国内消費量見通し>資源保有量、を満たす国々。生産品による利益追求（生産コスト低減）。
- ・購入予算総額は GDP の $\alpha\%$ とする。
- ・エネルギー未調達分がある場合は、石炭で補充するか未調達のまま予算余剰分を発生させる。この場合、この影響はエネルギー弾性率低減、エネルギー消費量減、および輸入量減少に反映する。
- ・輸入国 A：経済成熟国（低成長率）、資源なし。

- ・輸入国 B：発展途上国（高成長率）、石炭資源豊富、輸入不足分は石炭で補充可能。

<輸出国>

資源保有量>国内消費量見通し、を満たす国々。販売利益追求（コスト競争）。

- ・輸出国 C：石油、天然ガス（石油が豊富）。

- ・輸出国 D：石油、天然ガス（天然ガスが豊富）。

- ・輸出国 E：石炭。

<諸コスト>

- ・生産コスト：残存資源量／可採可能資源量比の関数で、開発生産により漸増する。ただし、開発費の投資により可採可能資源量の増加が可能。

<環境的条件>

- ・CO₂排出量：石炭>石油>天然ガス。

<取引>

- ・取引形態：相対による個別取引。

- ・取引頻度：輸入国が毎年、輸出国と取引し、石油、天然ガス、石炭のいずれかを購入、いずれバイオエネルギーを検討。

- ・取引順番：毎年、ランダムに決められる。

- ・取引価格：売り手、買い手双方の合意による。

- ・取引選択決定時の評価項目：輸出国・高利益+長期的に安定した利益を得る。石油、天然ガスの開発時期、開発への投資。輸入国・価格+CO₂削減目標の達成+長期的安定供給を得る。自国の経済成長と環境目標達成。

<各国の地政学的状況>

- ・経済：規模、成長率（成熟国 0.5%、発展途上国 1.5%）

- ・人口：絶対数、増加率（成熟国 0.5%、発展途上国 1.5%）

- ・需要特性：エネルギー弾性率（成熟国 0.9、発展途上国 1.1）

- ・在来型天然ガス資源：資源量・高低。開発状況・累積生産量、R/P 比

- ・原油資源：資源量・高低、開発状況：累積生産量、R/P 比

<生産及び生産コスト>

- ・経時変化：生産が進むにつれて生産コストは上昇する。

- ・C = y*C₀、C₀：初期コストで、石油、天然ガス、石炭により異なる。ただし、

$$0 \leq x \leq 0.5 : \quad y = 11.7x^2 - 11.7x + 3.925$$

$$0.5 \leq x \leq 1 : \quad y = -3.62x^2 - 3.62x + 0.095$$

なお、x=(R-Q)/R、R: 可採可能資源量、Q: 残存資源量。ただし、各油田、ガス田、炭田の生産開始時における初期コストは等しいとみなす。

- ・R を 1boe 増加させるには、4.3\$ の投資が必要。

炭鉱コスト平均 = 1.41\$/boe、

開発コスト平均 = 3.87\$/boe

<原油・天然ガスの公的価格>

・IEA 等による原油予測価格をベース。原油価格は年率 4.3% で上昇するとみなす。

・基礎データ：1978 年 12\$/bbl、2000 年 30\$/bbl

初期原油価格（案） = 100\$/bbl。

・天然ガス価格、石炭価格は原油価格にスライド：

$$\text{天然ガス価格 } P_g (\$/\text{ton}) = 5.98P_o (\$/\text{bbl}) + 64.9$$

$$\text{石炭価格 } P_c (\$/\text{ton}) = 1.33P_o (\$/\text{bbl}) + 7.61.$$

4.4 取引のシナリオ概要

エネルギー取引における具体的な商取引シナリオは以下のようである。

- ・4 国間の取引に関する最適解（評価関数：利益、または CO₂ 排出量）を GA にて予測し、これは各国の共通認識とする。即ち、これをベースに各国は資源取引における戦略をたてる。
- ・石油、天然ガスの標準価格 P は等しく年率 r で上昇するが、各国 GDP 平均伸び率が −Δ r を超えた場合は Δ P だけ急落する。
- ・輸出価格は、利益 + 生産コスト + 輸送コストとする。ただし、輸送コストは当面いずれの国も等しいとみなし、一定値を加えておく。LNG = 6\$/boe。
- ・毎年、輸入国 A、B の取引順をランダムに決定（ここでは A ⇒ B の順を仮定する）。
- ・A 国が C 国、D 国へ石油、天然ガスの輸出価格の提示を求める。
- ・C 国、D 国は標準価格をベースに、輸出価格を決定する。即ち、利益伸び率が自国の GDP 成長率を下回らないよう自国の生産コストに利益を上乗せし標準価格と比較の上、最終価格を決定。
- ・A 国はより安価な提示額を用いて国内エネルギー需要を満たし、かつ CO₂ 排出量現状維持するための最適なエネルギー内訳を求め、輸入量を決定。ただし、購入予算総額を G D P の 20% に相当する額とし、CO₂ 排出量は排出権取引も含めて現状を維持する。
- ・購入額が予算総額を超過し、調達できないエネルギー分がある場合その分だけ GDP が減少する。購入額が予算総額を下回り、予算余剰分が発生した場合は、エネルギー弾性率が下がり、エネルギー消費量も減るため、次年度の輸入量が当初予定より減少する。
- ・C 国、D 国はこの取引結果から、輸出価格の見直しを行う。
- ・石油、天然ガス探査開発への投資の有無、投資額を検討する：利益を計算し、最適値を求める。
- ・競争相手に敗れたエネルギー資源について利益率を低くし、輸出価格を下げるなどを検討。短期ならば利益率を低くする事が可能とする。下げる幅、期間等をシミュレーションし最適値を求める。
- ・B 国が C 国、D 国へ石油、天然ガスの輸出価格の提示を求める。
- ・C 国、D 国は見直した輸出価格を B 国へ提示。
- ・B 国は今回の取引において、A 国よりコストパフォーマンスが良くなることをねらう。
- ・A 国の購入額／G D P 比のハイ・ケース、ベース・ケース、ロー・ケースに相当する購入予算

総額を設定。

- ・B国はより安価な提示額を用い国内エネルギー需要を満たす最適なエネルギー内訳を求める。
- ・未調達が生じない限りで、購入予算総額／GDP比の低いケースを選択し、各エネルギーの輸入量を決定。
- ・購入額が予算総額を超過し、調達できないエネルギー分がある場合はその分だけGDPが減少する。購入額が予算総額を下回り、予算余剰分が発生した場合は、エネルギー弾性率が下がり、エネルギー消費量も減るため、次年度の輸入量が当初予定より減少する。
- ・これらの取引を毎年繰り返す。

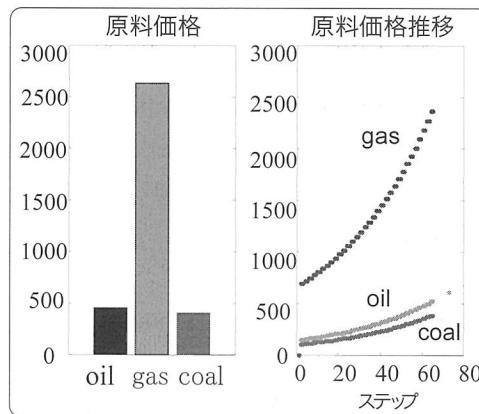


図14 原料価格推移シミュレーション例

5. おわりに

非在来型エネルギー取引市場における様々な要因が市場全体に及ぼす影響を予測できるシミュレーションモデルに関する研究はまだ広く行われていない。しかし、これら人工市場モデルによる市場動向の予測が可能となれば、非在来型エネルギーの利用促進を図るとともに、天然ガス需給の安定化に対する見通しが得られ、今後天然ガスの需要が伸びるアジアにおいては特に有効な分析的情報を与えてくれる。より一般的なマルチエージェントシステムへの拡張は、現実にあるがままの社会の営みと運行経路の分析を可能にし、われわれに信頼、安心、希望を与えてくれる社会システム設計のヒントを与えてくれるかも知れない。

参考文献

- [1] 佐和隆光：「20世紀を振り返る－21世紀への橋渡しとして必要なものは何か－」、トリレンマシンポジウム、電力中央研究所、(2000)
- [2] 長尾智晴：『最適化アルゴリズム』昭晃堂、2000
- [3] 塩沢由典「自律分散複雑系としての市場経済」『計測と制御』Vol.10、p.658～662、(1999)
- [4] 寺野隆雄「エージェントベースモデリング」『計測と制御』Vol.12、p.927～931、(2004)
- [5] 大内東・山本雅人・川村秀憲：『マルチエージェントシステムの基礎と応用』コロナ社、(2002)
- [6] 山影進・服部正太：『コンピュータのなかの人工社会』構造計画研究所、(2002)
- [7] 畑貴司：マルチエージェントモデルを用いた交通流シミュレーション、電気関係学会、2003

- [8] 古田一雄・森野耕平:「世論形成のマルチエージェントモデルによるシミュレーション」、『計測制御学会論文集』 Vol.42、p.91-97、(2006)
- [9] 寺崎大二郎、松尾誠治、藤田和男「アジアにおける CBM 生産が在来型天然ガス供給に与える影響の予測」『日本エネルギー学会誌』 Vol.86、p.94～101、(2007)