

地域熱供給システム事業における マルチエージェントシステムの導入に関する研究

A study on application of multi-agent system on the project of introducing co-generation system

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 澁谷 聡一 (Soichi Shibuya)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 内田 賢悦 (Ken-etsu Uchida)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 萩原 亨 (Toru Hagiwara)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 加賀屋誠一 (Seiichi Kagaya)

1.はじめに

資本主義社会においては、一般に様々な利害関係を持ち合わせた異種の行動主体が介在している。それぞれの行動主体は、それぞれの価値基準に従い、利益をひたすら追求する傾向がある。しかし、そのために社会的に見て大きなプラスの効果をもたらすような事業が、それに関わる行動主体のそれぞれの価値判断基準という枠に阻まれてしまい、実現に至らないことが考えられる。

しかし、それぞれの行動主体が互いに協調しあうことで相乗効果が生まれ、事業の実現に近づくことは十分に考えられ、それによって得られる効果も大きいと考えられる。

本研究はそうした主体ごとの行動に着目し、協調による効果をマルチエージェントシステムの導入により明らかにすることを目的としている。積雪寒冷都市において有用であると考えられながらも、設備コストがかさみ、実現が困難であるとされる熱供給事業が各行動主体間の協調によって実現へ近づくことを示す。

2.本研究の背景

北海道では冬季において積雪により道路を中心とした都市交通機能が低下し、そのことが社会経済活動に多大な影響を及ぼしている。さらに、堆雪による交通容量の低下は交通渋滞を引き起こし、それによる自動車の低速化、アイドリング時間の増大は、自動車の燃費性能を悪化させ、NO_x等の温室効果ガスの発生をも増大させる結果となっている。

また、北海道は寒冷な地域であるため、冬季において暖房エネルギーを多く必要とする。図1は1996年における北海道の1世帯あたりの年間エネルギー消費量を示したものである。全国平均の1.4倍である。また、消費量の約7割を石油が占めており、北海道は石油依存度が高いということがわかる。石油の採掘可能年数は43年と他の資源と比べて短く、このことから北海道は極めて脆弱なエネルギー消費構造となっているといえることができる。したがってエネルギーの効率化は今後の積雪寒冷地において重要な課題となっている。

これらの問題を軽減する策として有効と考えられるのが、現在デンマークをはじめとする北欧の都市などで導入されている地域熱供給システムである。

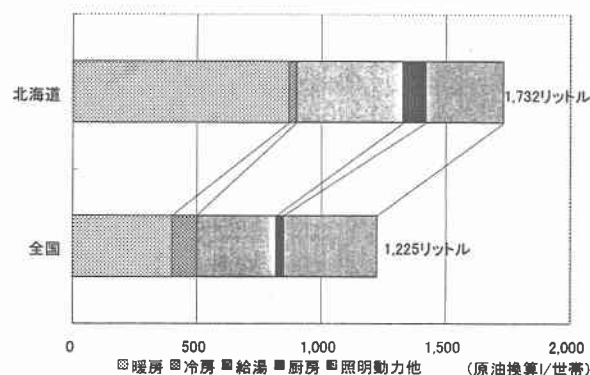


図1 1世帯あたりエネルギー消費量(1996)
(出所：日本エネルギー研究所)

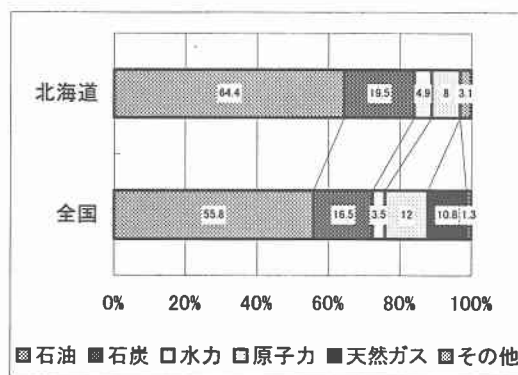


図2 1次エネルギー総供給の比較(1995)
出典：北海道経済連合会「21世紀へ向けた北海道のエネルギービジョン」

表1 世界のエネルギー確認埋蔵量

	確認埋蔵量	採掘可能年数	調査年
石油	10,195億バレル	43	1998年
天然ガス	144兆m ³	63	1998年
石炭	10,316億トン	231	1993年
ウラン	436万トン	72	1997年

出典：総合エネルギー統計（平成10年度版）
原子力白書（平成10年度版）

3. 地域熱供給システム

本研究において考える地域熱供給システムは、熱供給発電所において電力を生産するときに発生した熱および、ゴミ処理場、下水処理場からの排熱といった未利用エネルギーを温水パイプを通して地域暖房として住居等に供給し、さらにそのロードヒーティングや融雪槽といった積雪対策設備に利用するものである。

地域熱供給システムを導入することの目的は多種多様であるが、エネルギー問題、環境問題、積雪問題等を一元的に軽減する効果が最も大きい。さらにその効果も多方面に渡るものと考えられる (図3)。

3.1 地域熱供給システムにおけるコストの削減要素

前述の通り地域熱供給システムの効果は極めて大きいにも関わらず実現化を妨げているのは多額の建設コストである。いかにコスト削減を図るかが事業成立へ向かう鍵を握ると考えられる。

コストを削減する要素としては次のものが考えられる。管材コストの削減、管敷設位置の浅部化、共同溝の共同利用による出資金の分担、通信会社洞道の利用が挙げられる。その他に下水処理場排熱、ゴミ処理場排熱などといった未利用エネルギーの活用がコスト削減要素として挙げられる。

これらの要素に関しては様々な主体が関わっており、コスト削減のためにはそういった主体の協調が不可欠である。

ただし、これらは法的規制がなされており、規制緩和がなされることが前提としての話である。

4. マルチエージェントシステムにおける協調的戦略²⁾

4.1 マルチエージェントシステムについて

マルチエージェントとは自己の価値判断基準を持って周囲の状況を認知し、行動することのできるエージェントから構成される集合体のことである。

マルチエージェントの最適な行為を決定する上でその評価基準をいかに設定するかは重要なことである。

集団や社会の一員として自己の行為を決定する際、最適な行為を決定する合理性には次の2つの異なった考え方がある。すなわち、

- ①自らの目的や利益の最適化を目指す、個人合理性
- ②集団に共通する目的や利益の最適化を目指す、集団合理性

個人合理性を満たす解を競争解、集団合理性を満たす解を協調解という。本研究においては地域熱供給システムの導入という集団に共通の目的を持つものと考えられ、各エージェントは共通目的を追求することによって集団合理性を達成するものとした。よって地域熱供給システムによる利益の最適化は協調解となる。

4.2 マルチエージェントシステムにおける協調解

前述したように、地域熱供給システムの最適な計画を行うためには協調解を求める必要がある。

マルチエージェントシステムにおける協調解は次のような推論プロセスにより求められる。

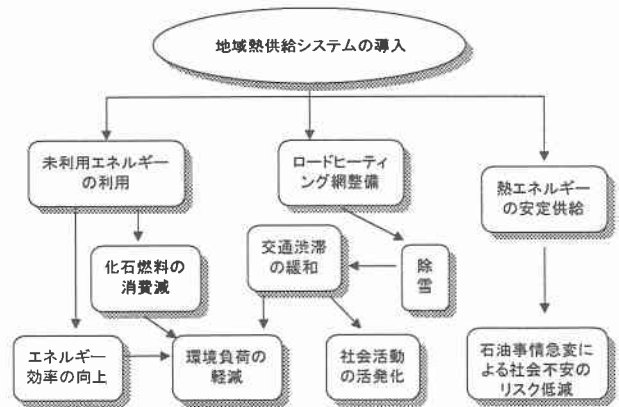


図3 地域熱供給システム導入による効果波及フロー

マルチエージェント $G=\{A_i:i=1,2,\dots,n\}$ による戦略的状況において、各エージェント $A_i \in G$ の私的な効用が自己の戦略だけでなく他エージェントの戦略にも依存する関数として式(1)で表す。

$$U_i(x(i), x_i) = x_i(a_i - \sum_{j=1}^n b_{ij}x_j) \quad (1)$$

ここで、 a_i 、 b_{ij} はエージェント内部の性質およびエージェント間の相互依存関係によって決まるパラメータである。

各エージェントは自分の効用以外に他のエージェントの効用の増進を目指すものとし、エージェント A_i の効用関数を私的な効用と他エージェントの効用の和として式(2)で定義する。

$$\hat{U}_i(x(i), x_i) = U_i(x(i), x_i) + \lambda_i \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j(x(j), x_j) \quad (2)$$

ここで λ_i は各エージェント $A_i \in G$ の私的な効用と他エージェントの効用の間における相対的重要度を示している。式(2)で与えた効用関数を最適にするエージェントは他エージェントの効用増進にも配慮する利他的性質を持つ。ここで、各エージェントの相対的重要度は同じと仮定し、 $\lambda_i=1$ と仮定する。すると各エージェントの効用関数は同じ関数として、式(3)で与えられる。

$$\begin{aligned} \hat{U}_i(x(i), x_i) &= \sum_{i=1}^n U_i(x(i), x_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \{x_i(a_i - \sum_{j=1}^n b_{ij}x_j)\} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)は集団 G を構成するすべてのエージェントの効用関数の総和であることから、集団に共通する効用関数となる。各エージェント $A_i \in G$ の協調的戦略は共通の効用関数、すなわち式(3)を最大化する。これは、式(4)を満足する解として求まる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{U}}{\partial x_i} &= \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \\ &= a_i - \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j - \sum_{j=1}^n b_{ji} x_j \\ &= 0\end{aligned}$$

(i=1,2,...,n, j=1,2,...,n) (4)

ゆえに、協調的戦略は次の行列方程式を解くことによって得られる。

$$\begin{pmatrix} 2b_{11} & \cdots & b_{1i}+b_{i1} & \cdots & b_{1n}+b_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{i1}+b_{1i} & \cdots & 2b_{ii} & \cdots & b_{in}+b_{ni} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1}+b_{1n} & \cdots & b_{ni}+b_{in} & \cdots & 2b_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$$

(5)

5. 地域熱供給システム事業へのマルチエージェントシステム導入

ここでは具体的な地域熱供給システム事業においてマルチエージェントシステムに基づいて考えてみる。地域熱供給事業を行う上では様々な主体が関与しており、複雑に絡み合っている。それら主体の設定及びモデルの概要は以下ようになる。

5.1 エージェントの設定

本研究において主体として地域熱供給システムの運営管理を行う熱供給事業体と、熱供給の恩恵を受ける地域、そして、熱供給事業の促進に影響を及ぼすと考えられる自治体、電力会社、通信会社の5つのエージェントを想定している。

5.2 モデルの前提

モデルの前提は以下の通りである。

◆熱生産

熱を生産する主体は自治体、電力会社、熱供給事業体であり、自治体はゴミ処理場、下水処理場を熱源とし、供給するものとする。

熱供給発電所は熱供給事業体が建設し、熱生産するものとするが、電力会社が事業参加する場合は、電力会社が建設するものとする。熱のフローは図4に示す通りで全熱供給熱量はHとする。

◆熱供給管

熱供給管は普通配管と洞道の2種類とする。

通信会社は洞道を熱供給事業体に対してリースするものとする。リースした分は熱供給事業体が新たに熱供給管を建設しないで済むものとする。

洞道への埋設料は熱供給事業体が負担するものとする。

◆出資係数

電力会社、通信会社が熱供給事業によって得た利益から出資するものとし、その出資比率を α (0~1)で表すものとする。自治体に関しては未利用エネルギーの売上と

除雪費用削減による利益からどれくらいの割合で出資するか比率となる。

◆ロードヒーティング網

ロードヒーティング網の建設は熱供給事業体が行うものとする。それにより、その面積分の除雪費用が削減され、そのほかの便益としてロードヒーティング便益(旅行時間短縮、走行費用減少、交通事故減少転倒事故減少)を考え、20.3億円/年(工藤,2000)³⁾を用いる。

以上の前提を基に各主体間のキャッシュフローを図5に示す。

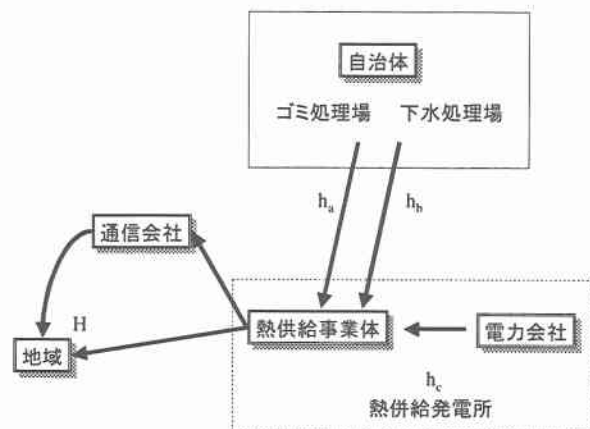


図4 地域熱供給事業における熱フロー

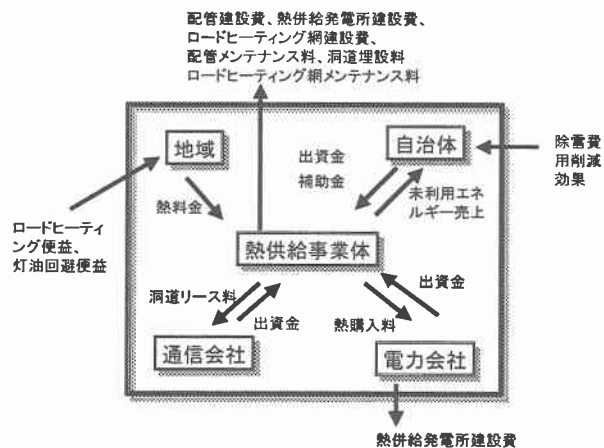


図5 地域熱供給事業におけるキャッシュフロー

5.3 戦略関数の設定

戦略関数としては金銭的な便益をあてはめる。その理由はそれぞれのエージェントが便益を基準として、自分の行動を決定しているためである。図5に見られるキャッシュフローを定式化することで戦略関数を得ることができ、各エージェントで以下のように設定した。

なお、熱の取引単価(C_a, C_b, C_c)を変数として扱い、その他の値は条件あるいは定数として設定するものとする。

★自治体 (A₁)

熱供給事業体に対して補助金を出す。また事業参加する場合は、自ら所有する未利用エネルギー(下水熱処理場、ゴミ処理場から排出される熱)を熱供給事業体に卸売する。また、その売上とロードヒーティングによる除雪費削減費用から出資する。よって自治体の戦略は式(6)のようになる。自治体 (A₁) における戦略を x₁ とすると、

$$x_1 = -F + (1 - \alpha_1) \{ C_a (h_a \delta_2 + h_b \delta_3) + AC_e \} \quad (6)$$

F : 自治体が出す補助金

α_1 : 自治体の出資係数(0~1)

A : ロードヒーティング網面積

C_a : 熱卸売単価

C_e : 除雪単価

h_a : ゴミ処理場からの排熱量

h_b : 下水処理熱排熱量

δ_2 : ゴミ処理場の熱を活用する(=1)or しない(=0)

δ_3 : 下水処理場の熱を活用する(=1)or しない(=0)

★通信会社 (A₂)

自らが所有する洞道を熱供給事業体にリースし、リースによって得た利益から出資するものとする。よって通信会社の戦略は式(7)のようになる。通信会社 (A₂) における戦略を x₂ とすると、

$$x_2 = (1 - \alpha_2) L_b C_k \quad (7)$$

α_2 : 通信会社の出資係数(0~1)

L_b : リース洞道延長

C_k : 洞道リース単価

★電力会社 (A₃)

事業参加する場合は熱電併給発電所を熱供給事業体に代わって建設し、熱供給事業体に熱を卸売する。それによって得た利益から出資するものとする。よって戦略は式(8)のようになる。電力会社 (A₃) における戦略を x₃ とすると、

$$x_3 = (1 - \alpha_3) (\delta_1 C_b h_c - \delta_1 P) \quad (8)$$

α_3 : 自治体が出資係数(0~1)

δ_1 : 電力会社が熱生産する(=1)or しない(=0)

C_b : 電力会社の熱卸売単価

h_c : 熱併給発電所生産熱量

P : 熱併給発電所建設費

★地域 (A₄)

熱供給事業の恩恵を受ける主体である。またロードヒーティングにより便益を受けるものとする。ここでは除雪削減による効果は無いものとする。灯油購買を回避することによる便益も受ける。地域 (A₄) における戦略を x₄ とすると、

$$x_4 = AC_r (C_c - \beta C_d) (\delta_2 h_a + \delta_3 h_b + h_c) \quad (9)$$

C_c : 対消費者熱料金単価

C_d : 灯油単価

C_r : ロードヒーティングによる便益

β : 灯油換算係数(熱供給量→灯油量)

★熱供給事業体 (A₅)

モデルの中心であり、熱供給事業を中心となって行う主体とする。電力会社、通信会社より出資金を受け、また自治体より出資金、補助金を受ける。熱供給管とロードヒーティングにおける建設及び維持管理を行うものとする。熱供給事業体の戦略は式(10)のようになる。熱供給事業体(A₅)における戦略を x₅ とすると、

$$\begin{aligned} x_5 = & F + C_k (\delta_2 h_a + \delta_3 h_b + h_c) \\ & + \alpha_1 \{ C_a (h_a \delta_2 + h_b \delta_3) + AC_e \} \\ & + \alpha_2 L_b C_k + \alpha_3 (\delta_1 C_b h_c - \delta_1 P) \\ & - P(1 - \delta_1) - C_a (h_a \delta_2 + h_b \delta_3) - \delta_1 C_d h_c \\ & - L_a (C_i + C_j) - L_b (C_k + C_l) - A (C_g + C_h) \end{aligned} \quad (10)$$

L_a : 配管網延長

C_i : 配管網建設単価

C_j : 配管メンテナンス単価

C_k : 洞道リース(メンテナンス含)単価

C_l : 洞道埋設単価

C_g : ロードヒーティング建設単価

C_h : ロードヒーティングメンテナンス単価

以上のように設定して得られた各 x_i は 4.3 で述べた推論プロセスに基づき協調的戦略、すなわち集団としての効用が最大となる各エージェントの便益を得ることができる。

6. おわりに

事業を行う場合、各主体は自己の利益のみを追求しがちである。本研究で取り上げた熱供給事業のように単独主体で行うのには限界があるケースも多い。事業の中に協調しあえる部分を見つけ、協調しあうことで社会全体の効用も高まる。そういったことから、協調のあり方を探求していくことは非常に重要なことである。そのためにも協調の効果を定量的に評価することが今後ますます必要となると考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人北海道地域総合振興機構; 平成 11 年度都市熱供給システム形成調査業務報告書
- 2) 生天目章; マルチエージェントと複雑系, 森北出版, 1998.11
- 3) 工藤健一; GIS を用いたロードヒーティング網計画代替案の評価に関する研究, 北海道大学修士論文, pp98-126, 2000.3