別　刷

設計工学

公益社団法人　日本設計工学会誌

2014年　第 49 巻　第 7 号

（　P．358 ～ P．368　）

シナリオとマルチエージェントシミュレーションによる超システムの設計方法論－モジュール交換型社会共有エネルギーシステム設計による試み－

野間口　大，栗山　裕，藤田　喜久雄

A Study on Design Methodology for System of Systems with Scenario and Multi-agent Simulation　— Case Study of Socially Exchangeable Modular Energy System Design —

Yutaka NOMAGUCHI, Yutaka KURIYAMA and Kikuo FUJITA

公益社団法人 日本設計工学会

解説

シナリオとマルチエージェントシミュレーションによる超システムの設計方法論*

－モジュール交換型社会共有エネルギーシステム設計による試み－

A Study on Design Methodology for System of Systems with Scenario and Multi-agent Simulation

－ Case Study of Socially Exchangeable Modular Energy System Design －

野間口　大*1　（Yutaka NOMAGUCHI）
栗山　裕*2　（Yutaka KURIYAMA）
藤田　喜久雄*1　（Kikuo FUJITA）

Key Words : system of systems engineering, co-creational systems, multi-agent simulation, scenario design, energy system

1.　はじめに

工学的な設計は，何らかのシステムについての計画をつくり出す行為である．システムとは広義には「相互に関連する，または相互に作用する要素の集まり[1)]」と定義されるが，工学的な観点[2)]では何らかの目的を持った人工物を指し，製品のほか，サービスや社会制度などを意味する．システムの設計の支援に向けては，システム工学の分野において体系的な方法論が研究されており，各種のシステムの設計において活用されている[3)]．システムの目的や内容を明確化するためのモデリング手法，および，設計解の客観的な評価基準と数理的な枠組みによる設計最適化の手法は，システム工学の中心となる技術である．

一方で，システムの設計は，元来，高度に開放系の問題であり，個々のサブシステムの最適性は，周囲に存在する他のシステム群との相互作用とそこに含まれる不確実な要因に大きく依存する．エネルギー問題はその一例である．エネルギー問題には，エネルギー機器システムの効率向上の問題だけでなく，エネルギー事業者，行政，需要家である地域社会や個々の家庭に至る各種のステークホルダーの利害が関係しており，また，そこに含まれる要因は長期的な視点のもとでの検討が必要であるために因果関係が複雑であり，多くの不確実要因を含んでいる．こうした状況で問題の境界を明確に定めたり，客観的な評価を行うことは困難である．

不確実性を考慮しつつ，システム設計で考慮する範囲を個々のシステムの周囲を含むシステム群へと拡大することが要請される．システム設計におけるこのような視点はSystem of Systems（SoS）[4)]と呼ばれ，超システムとも訳される．超システムの設計問題を解決するにあたっては，閉鎖系のシステムの設計を対象とする従来のシステム工学を超えた，新たなアプローチのもとでの体系的な設計方法論が求められる．

本報では，超システムの視点のもとでのシステム設計の考え方を解説するとともに，シナリオ[5)]とマルチエージェントシミュレーション（Multi-Agent Simulation；MAS）[6)]を活用した新しいシステム設計方法論の提案を試みる．この設計方法論においては，超システムを構成する複数のステークホルダーの挙動に着目して設計問題をモデル化し，その共創のしくみのもとで実現されるシステム全体としての最適性を探求することを考える．超システムの具体的な検討例として，モジュールの交換が可能な家庭用燃料電池コージェネレーションシステム[7)]（Co-Generation System；CGS）の設計問題を取り上げる．この問題は，(i)燃料電池システムの機器設計問題，(ii)モジュール交換などの運用サービスの設計問題，(iii)燃料電池システムの社会共有を実現するための補助金制度の設計問題，の3つの問題の相互作用を内包しており，これをMASによる共創のしくみにより解くこととする．その結果を踏まえ，提案した設計方法論の有効性を検証する．

*　原稿受付　2014年3月31日
*1　正会員，大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻
（〒565-0871　吹田市山田丘2-1）
*2　非会員，岡山大学医学部医学科
（〒700-8558　岡山市北区鹿田町二丁目5番1号）

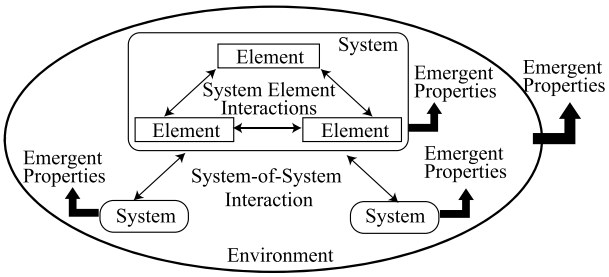

図1　超システム(System of Systems)

2.　システム設計の課題と共創によるアプローチ

2.1　超システムの視点とシステム工学の課題

今日，システム設計が対象とする範囲が拡大してきていると指摘されている．その理由は，個別のシステムが巨大化，複雑化しているだけでなく，エネルギー問題に代表されるようにシステムと周囲の環境とが相互に与える影響の考慮が要請されていることによる．拡大した設計対象は超システム[4]と呼ばれ，特に米国の航空宇宙産業や防衛産業でその必要性が指摘されている．超システムは，図1に示すように自律した複数のシステムによって構成される1つの大きなシステムである．

システムの設計のプロセスは，一般に，問題の明確化，解候補の生成・詳細化，分析・評価，修正，の各ステップの繰り返しにより実施されるとされている[3]．伝統的なシステム工学においては，システムとその外部の環境との区別が明確であることが前提となっている．その場合，巨視的な視点からのモデル化や数式化，最適化計算による解の生成・評価が有効である．一方で，超システムの設計問題においては，設計対象が個々のシステムではなくなり，複雑な相互作用を持つ多種多様なシステム群となる．伝統的なシステム工学の手法である各種のシステムモデリング手法や最適化計算は部分的には利用可能であるものの，開放系の問題であるために，その効果には以下のような限界があることが指摘されている[3]．

(1) 全体の目的を明確に設定することができない．
(2) 全体の問題に対する解候補を網羅的に生成することができない．
(3) 解の評価において客観的な基準の下での分析ができない．
(4) 問題が真に解決に至ったかどうかの判断ができない．

このような指摘に対して，システムの設計段階と運用段階を連係させ，システムが実際に現実世界に与える影響を見ながら，設計の内容を柔軟に修正することを目指すソフトシステムアプローチ[8]と呼ばれる考え方も提唱されているものの，体系的な設計方法論への展開には至っていない．

2.2　創発・共創とマルチエージェントシミュレーション

システムの開放性を取り扱うための概念として，創発[9]および共創[10]が提唱されており，そのシステム設計方法論への展開が期待されている[10), 11]．創発とは，多数の要素から成るシステムにおいて，要素間の局所的な相互作用によりボトムアップ的にシステムの大域的挙動が現れ，その大域的挙動が要素の振る舞いを拘束するという双方向の動的過程を通して，要素の単純な総和にとどまらない新しい機能や形質，行動を示す秩序が形成されることである[9]．前述の図1においては，超システムを構成する複数のシステムの間の創発を通じてシステム全体の挙動が現れる様子を示している．創発の結果，システム全体として有効な解を創出することを共創と呼ぶ[12]．

マルチエージェントシミュレーション(MAS)は，創発や共創を計算機でシミュレートするためのツールである[13]．エージェントとは共創に関わる複数の主体的な要素であり，その振る舞いとエージェント間の相互作用がMASのモデルとして定義される．主として何らかの社会的な現象を含む対象のモデル化とその分析，設計に活用されており[14)～16]，環境・エネルギー問題への応用も行われている[17), 18]．

創発・共創の概念と，その計算機上での表現手段であるMASは，多種多様なステークホルダーを考慮せざるを得ない超システムの設計問題に対する有望なアプローチとして期待されている[4]．これに向けては，実際の適用事例も見られる[19]ものの，それらの事例は，設計対象の分析に留まるか，概念レベルでの検討に留まるものであり，数理的な最適化も踏まえた超システム全体の設計にまで踏み込んだものにはなっていない．それに向けては，共創の概念に基づいた新しい体系的な方法論が必要と考えられる．

2.3　シナリオ

一般に，計算機によるシミュレーションの結果は，境界条件などの各種条件の設定に依存する．MASは，創発を通じてシステム全体の振る舞いをモデル化するという性質上，その影響が顕著に表れやすい．そのため，システム設計のツールとして用いる上では，得られるシミュレーション結果をある程度予測

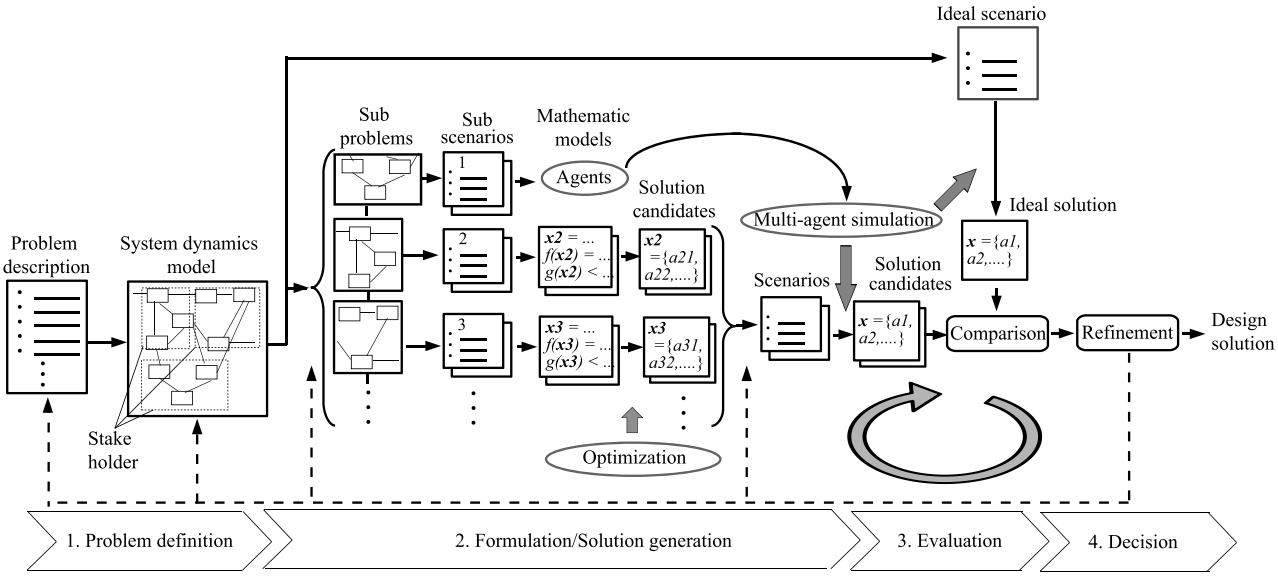

図2　超システム設計方法論の概略

しながら，条件を設定する必要がある．これらの内容は通常はシミュレーションを行う設計者の暗黙的な知識に留まっている．近年，特にシミュレーションの検証や妥当性確認を確保する視点から，その明示的な記述が課題であることが指摘されている[20), 21)]．創発を通じてシステム全体の振る舞いをモデル化するという特徴を考えれば，超システムの設計問題におけるこの種の内容の明示的な記述は，一般的な設計問題よりも重要な意味を持つ．

これに対しては，シナリオの概念が有効であると考えられる．シナリオは企業や各種の組織の戦略策定のために活用されており，そこでは「それぞれ十分に起こりうるが，構造が異なる複数の未来像」といった定義がなされている[22)]．シナリオの目的は，経営者やマネージャーの興味を刺激し，新たな発想を引き出すことである．このため，シナリオは，通常，厳密な確率論的表現ではなく，起承転結の物語形式でまとめられる．各種の要因の因果関係を記述できるため，多くの不確実な要因が関係するシステム設計における有効性が指摘されており[23)]，環境・エネルギー問題への対応に向けた取り組みも行われている[24)]．

3.　超システム設計方法論の検討

2.1節での指摘に対して本研究では，2.2節で述べた共創の考え方，および2.3節で述べたシナリオの考え方に基づいた設計方法論を提案する．図2に，この方法論における手順を示す．2.1節で述べた問題点との対応を踏まえながら，以下にその詳細を述べる．

(1) 超システムの設計問題について，全てを包括する目的を明確に設定することは不可能である．そこで，関連する個々のステークホルダーに着目し，ステークホルダーがそれぞれの目的を達成するために自律的に活動することを想定して，関連する様々な因子およびそれらの間の関係を抽出する．エネルギー問題を例に取ると，エネルギー事業者，需要家，エネルギー機器メーカー，行政などのステークホルダーが存在し，それぞれが，経済的な利益の最大化やエネルギー消費量の最小化などの目的を持って行動している．なお，因子間の関係の記述にあたっては，システムダイナミクス[3)]の手法を用いる．

(2) ステークホルダーがそれぞれの目的を達成する活動を部分問題として設定し，部分問題の連係により全体問題を解くことを考える．具体的には以下のようにする．

まず，それぞれの部分問題について，得られると予想される解の内容とそれに関連する要因を，自然言語で明示的に記述する．本研究ではこれをサブシナリオと呼ぶ．

行政やエネルギー事業者などのように，その振る舞いの数理的表現が比較的容易なステークホルダーについては，必要に応じて，サブシナリオの内容に基づいて問題の定式化を行い，最適化計算を用いて解候補の集合を求める．一方で，一般家庭の需要家などのように多数の多様なステークホルダーが存在する場合について

は，個別のステークホルダーをエージェントとしてモデル化し，MASにより全体の振る舞いを求めることとする．また，このように全体を部分問題に分割して解く場合，個々の部分問題間の複雑な相互作用の取り扱いが課題となる．本研究では，MASを介して部分問題を連係させることにより，相互作用を取り扱うこととする．

最適化計算により求められた各部分問題の解候補を組み合わせることにより，全体問題に対して，得られると予想される解の内容とそれに関連する要因を，自然言語で明示的に記述する．これを本研究ではシナリオと呼ぶ．各シナリオのもとでMASを行い，全体問題に対する解を求める．シナリオはMASに対する境界条件の役割を果たす．

(3) 解の評価について，本研究では，あらかじめ想定しておいた理想状態のもとでの解を目標とし，それとの比較によって解の評価を行うことを提案する．評価した結果，シナリオを設計解として採用するか別のシナリオを構築し直すかの判断を行う．

(4) 開放系の問題であるために，問題が真に解決に至ったかどうかの判断をすることは不可能である．この点については，3.での評価において，複数のシナリオの下での結果の比較検討を繰り返しながら，適宜，部分問題や全体問題のモデルの構築の段階に戻って再検討し，問題定義そのものも徐々に具体化していくこととする．

4. モジュール交換型CGS設計を通じた検討例

本研究では，具体的な検討例として，モジュール交換が可能な家庭用燃料電池CGSの設計問題を取り上げ，前章で述べた方法論を適用してその設計問題を解くことを試みる．本設計では，あるべきエネルギーシステムの構築を目指して，そのために必要な機器の設計だけでなく，種々の社会制度の設計も視野に入れる．ここには，CGS導入を検討する家庭や機器メーカー，行政など種々のステークホルダーが関係しており，全体として超システムの設計問題を構成している．本章では，その設計問題の概要について説明する．

4.1 家庭用燃料電池CGS

近年，持続可能社会へ向けた技術の一つとして分散型エネルギーシステムが取り上げられる．その特徴は，従来の大規模設備による集約的なエネルギー変換とは異なり，局所的なエネルギー需要に応じて供給力の設備を柔軟に構成し，適切に運用することで，高いエネルギー効率を得ることにある．中でも，家庭用燃料電池CGSは身近な所で見受けらる分散型エネルギーシステムの典型例である．

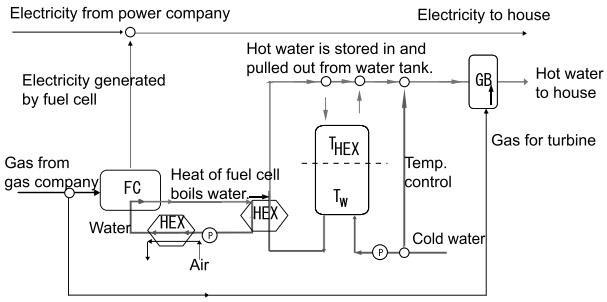

図3　家庭用燃料電池CGSの機器構成

CGSは，「二つ以上の有効な二次エネルギーを同時に発生するシステム」である[25]．一般には，熱電供給システムと訳されているように，有効な二次エネルギーとして熱と電気が考えられ，ガスエンジンやガスタービン，燃料電池などの発電機を駆動する際，その排熱を冷暖房・給湯などの熱供給に有効利用しようとするものである．家庭用燃料電池CGSの機器構成を図3に示す．主として燃料電池発電機(FC)，バックアップ給湯器としてガスボイラー(GB)，貯湯タンク(T_{HEX})の3つのモジュール，および2つの熱交換器(HEX)で構成される．燃料電池は発電効率が高いことから，CO_2削減および省エネルギーに適したCGSとして注目されている．一方で，政府や自治体による補助金制度もあるものの，導入・運用コストが高いことが課題で，十分な普及には至っていないのが現状である．

4.2 エネルギー需要の変動

家庭用エネルギーシステムはその導入先の家庭のエネルギー需要に合わせて設計する必要がある．しかし，家庭のエネルギー需要の前提となる家族構成は，個々人の結婚や出産，独立といったライフステージの変遷とも連動しながら変遷していく．そのような変化は社会の至るところで様々に生じて遷移していくことになる．このため，家族構成の変化は個々の過程に着目すれば時々に劇的に変化していく．したがって，長期間にわたって使用されるエネルギーシステムを設計する場合は，上記のような要因で生じるエネルギー需要の変動への対応が求められる．それに向けては，需要の変動がどのように起こるのかを理解することが非常に重要となる．本研究では，ある種の需要分布が社会的に広がっていて，

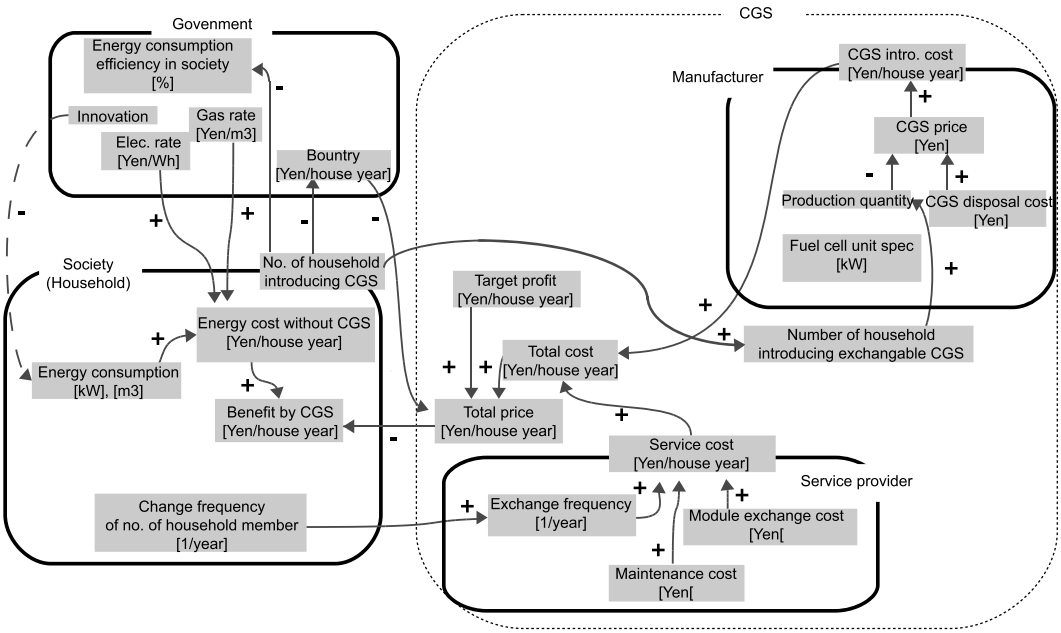

図4　システムダイナミクスモデル

社会全体としてみれば平均的に推移しているものと考える．すなわち，家庭用燃料電池CGSに対するエネルギー需要は，社会的に分布しながら変動するものの，全体としての様子は概ね特定の分布を保っているとみなす．

4.3　モジュール交換型社会共有エネルギーシステムによるエネルギー需要変動への対応

CGSはそれを構成する様々なモジュールの組み合わせによって総合性能を達成するシステムである．このことから，変化する需要に対しては，その一部のモジュールを入れ替えることによって対応することも期待できる．また，長期の使用を前提にすると，性能の劣化は避けられず，これについてもシステム全体を入れ替えるのではなく，各モジュールの物理的な寿命に応じて個々のモジュールを入れ替えていくことによって対応できる可能性がある．

また，エネルギー需要が社会全体に分布していることを踏まえれば，モジュールを社会全体で共有して，需要変動に合わせて交換するシステムを考えることができる．つまり，モジュールを各世帯が所有するのではなく社会で共有し，各世帯はその共有されたモジュールのなかから自分にとって最適なモジュールを選択し，利用する．このようにすることにより，各世帯が負担する導入・運用コストが下がり，燃料電池CGSの普及の促進も期待できる．

5.　設計問題定義と数理化

本章では，モジュール交換型CGS設計を実施するにあたり，その問題定義および数理化を3章で提案した方法論に従って行う．

5.1　対象のモデリング

まず，設計問題における評価指標として，社会全体のエネルギー効率および社会全体が負担するコストを想定する．次に，関連すると考えられるステークホルダーを列挙する．本研究では，CGSを製造，販売する「製造者」，CGSの保守・交換を行う「サービスプロバイダー」，エネルギーを購入，消費しながら必要に応じてCGSを導入する「世帯（社会）」，電力料金やガス料金，種々の補助金制度を決める「行政」の4者を設定する．なお本設計例においてエネルギー事業者は，世帯の要求に応じてガスと電気を供給し，行政が決定した価格に従ってエネルギー料金を世帯から徴収する存在として考慮するものの，自律的に行動するステークホルダーとはしないこととする．また，社会全体のエネルギー消費量を計算するにあたり，エネルギー事業者が供給する電気もすべてガスによる火力発電で生み出されるものと考え，電気消費量をガス消費量に換算して考える．

次に，システムダイナミクスモデル[3)]の記法に従い，各ステークホルダーの視点の下で，問題に関係すると思われる因子を列挙し，関連する因子間の関係を整理する．図4はその結果の一部を示したものである．ここでは，因子間に正の相関関係がある場合に「+」記号を用い，負の相関関係がある場合に「-」記号を用いている．例えば，一般家庭における

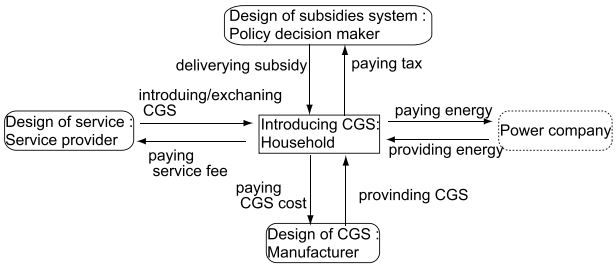

図5　ステークホルダー間の依存関係

「CGS導入による利益」は，一般家庭がCGSを導入するかどうかを判断する基準となる因子である．この因子は，「CGSを導入しなかった場合のエネルギーコスト」とは正の相関があり，「CGSの価格」とは負の相関がある．また，「CGSを導入した世帯の数」が増加すると「CGSの生産台数」が増加し，量産効果で「CGSの価格」が下がるので，結果として，一般家庭における「CGS導入による利益」が増える．

5.2　部分問題の定義

各ステークホルダーは自らの目的のもとで自律的に行動しており，それぞれが，モジュール交換型CGSの設計問題を構成する部分問題となっている．部分問題の内容と，そのもとでのサブシナリオは以下のように考えることができる．

- 世帯(社会)は，CGSの導入およびランニングコストと，その世帯のエネルギーコストとを踏まえ，CGSを導入する利点があるかを判断する．ここでは，CGS導入・交換の判断の方針がサブシナリオとなる．
- CGS製造者は，利益を最大化できるように，エネルギー需要に応じた燃料電池CGSの機器ラインナップやモジュール構造などの設計を行う．ここでは，モジュール設計や機器ラインナップの計画などの方針がサブシナリオとなる．
- サービスプロバイダは，利益を最大化できるように，燃料電池CGS機器導入，モジュール交換などの運用サービスを設計する．ここでは，導入・交換費用の計画の方針がサブシナリオとなる．
- 行政は，税金に代表される社会全体の負担を最小化するように，補助金制度を設計する．ここでは，補助金額や支給方法などの計画の方針がサブシナリオとなる．

5.3　部分問題の連係

CGS製造者，サービスプロバイダ，行政，およびエネルギー事業者は，世帯(社会)を介して相互に依存関係を持つ．**図5**に各ステークホルダー間の依存関係を示す．

4つのステークホルダーのうち，世帯(社会)は，独立した多数の多様な世帯から構成されるものであるため，個々の世帯をエージェントとするMASとしてモデル化することが妥当と考えられる．MASによって実現される社会モデルを介してCGS製造者，サービスプロバイダ，行政の3つの部分問題を統合する．具体的には，**図5**に示した部分問題間の関係性を前提としながら，各部分問題の連係を以下のように進める．

(1) **世帯：エネルギー需要と機器導入・交換挙動のモデル化**…世帯の構成人数が変化する出産，結婚，独立などの人生のイベントを，需要変動を引き起こす因子とみなし，その発生確率を与えて，世帯の需要変動を予測するシミュレーションを構成する．また，燃料電池CGSを導入したり，モジュールを交換したりする際の判断基準についてルール化し，各世帯の挙動をシミュレートできるようにしておく．

(2) **CGS製造者：CGS機器の最適設計**…1の需要変動のもとで，最適なエネルギー供給能力と最適な運転スケジュールを持つCGS機器のラインナップの解候補を生成する．

(3) **サービスプロバイダ：モジュール導入・交換サービス**…導入・交換コストについて複数の解候補を生成する．

(4) **行政：補助金制度の設定**…補助金制度の設計について複数の解候補を生成する．

(5) **社会全体でのコスト・エネルギー効率の計算**…2，3，4の解候補をもとに作成したシナリオについて，社会全体で必要となるコストとエネルギー効率を1. を利用して計算し，有望なシナリオについて検討する．

以下の各節では，上記の1，2，5の数理モデルの内容について述べる．3. および4. の内容については計算例に沿って次章で説明する．

5.4　世帯の需要変動と機器導入・交換の挙動のモデル

5.4.1　需要変動

家庭のエネルギー需要は電力使用量と熱エネルギー使用量に相当するガス消費量により表されるとする．生協総合研究所のデータ[26]によれば，家庭のエネルギー需要量は世帯の構成人数に依存し，**図6**のようになっている．おおまかに分類すると，単身世帯(S_1)，2～4人世帯(S_2)，5人以上世帯(S_3)の3つのパターンで代表させることができる．

家庭のエネルギー需要変動の生じる主要因はその

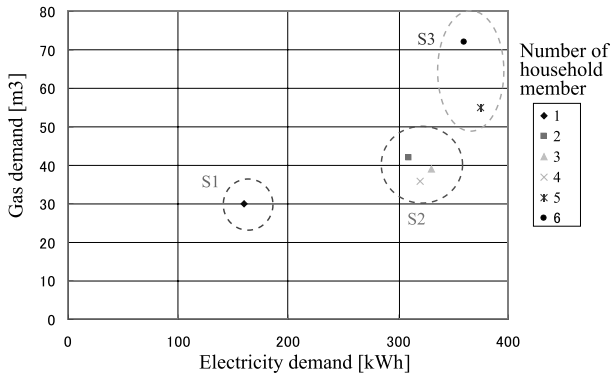

図6　エネルギー需要パターン

構成人数の変化である．本研究では，世帯の構成人数が変化する事象として結婚，出産(誕生)，独立，死亡を考え，それぞれに正規分布に従う発生確率を与えて人生をシミュレートするモデルを構築する[27]．この人生モデルによって，世帯の構成人数の分布の変化を求め，図6のデータに基づいて各家庭のエネルギー需要の変化を求める．実際には同じ世帯構成の家庭でもライフスタイルの違いによって需要量の差異が存在する．そこで，電力需要量，ガス需要量の双方に正規分布に従う乱数r_E，r_Qを乗じておく．なお，ここでのガス需要量は調理用と給湯用のものを指し，電力需要量はそれ以外のエネルギー需要量を指す．最近ではオール電化の家庭も増えているが，ここでは，正味の電力需要量とガス需要量を考えるのではなく，上記の意味での各需要量を考える．この場合，一般に電力需要の多い家庭はガス需要も多いと考えられるため，r_E，r_Qは共分散を考慮に入れた二次元正規分布に従うものとする．

5.4.2　機器導入・交換の判断

各世帯は，CGS未導入時の電気料金，ガス料金の合計が，CGSを導入した場合の運用コストおよび導入コストの合計を上回る時にCGSを導入するものとする．ただし，燃料電池CGSが普及すれば量産効果で機器の製造コストが下ることを想定し，普及台数に対して単調に減少する関数によって導入コストを計算する．

一方，CGS導入後に，物理的な劣化やエネルギー需要の変動などで燃料電池を交換する必要が生じる．交換の時期の判断については以下のルールのいずれかに合致した場合に，その時点でのエネルギー需要に合った電池に交換するものとする．

(1) 燃料電池の物理寿命が来た場合．

(2) 貯湯タンクなど他の機器の物理寿命が来た場合．すなわち，他の機器と燃料電池を同時に交換できる場合．

(3) 下記の式を満たしている場合．

$$C_1 - C_2 > C_t \tag{1}$$

ただし，C_1は現在使用している燃料電池での年間運用コスト，C_2は最適燃料電池での年間運用コストであり，常に$C_1 - C_2 \geq 0$が成り立つ．また，C_tは1回当たりの交換コストである．

5.5　CGSの最適設計問題

エネルギー需要に見合わないCGS機器を導入すると不必要なコストがかかる．広範囲に渡って多様に分布するエネルギー需要に対応するためには，エネルギー供給能力の異なる複数種のCGS機器のラインナップを用意することが必要と考えられる．

CGS機器の最適設計における設計変数として，燃料電池発電機の定格出力を規定する燃料電池最大入力ガス量[kW]，および貯湯タンクの容量[ℓ]を設定する．ガスボイラーは，瞬間的な熱需要に対応するものであるため，世帯のエネルギー需要量に関わらずその定格出力は一定のものを使用するとし，本研究の計算例では17.5[kW]としている．目的関数は，1年あたりのエネルギーコスト，すなわち電力とガスを購入するのに必要なコストと，機器導入コストの償却費および運用コストの和である．エネルギー需要に対して必要な電力，ガスの量を計算するにあたり，燃料電池発電機における発電量，発熱量の数理モデル，ガスボイラーにおける発熱量の数理モデルが必要となる．本研究では線形近似された特性モデル[25), 28)]を利用する．

また，CGSの最適設計においては，1日の電力需要と熱需要の変化に合わせて燃料電池発電機の運転スケジュールを最適化することも考慮に入れる必要がある．これについては，生協総合研究所のデータ[26)]に基づいて1日の電力需要と熱需要の変遷を想定し，1日のエネルギーコストを最小化するような最適な運転スケジュールを求めておく．上述のCGSの最適設計におけるエネルギーコストの算出の際には，最適化された運転スケジュールを想定する．

5.6　社会全体でのコスト・エネルギー効率の計算

設計解の候補のそれぞれに対して，5.4節で構築した社会モデルに基づくMASを実施して，世帯ごとのエネルギー消費量とコストを算出する．シミュレーション期間は30年程度を想定する．設計案の評価指標としては，社会全体のエネルギー効率，および社会全体のコストを，1年，1世帯あたりに換算した数値を用いる．コストについての評価指標Cを下記の式で計算する．

$$C = \frac{\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(IC_i^t + EC_i^t + TC_i^t)}{\sum_{i=1}^{N} n_i} \qquad (2)$$

ただし，Tはシミュレーション年数，IC_i^tはt年目の世帯iにおける設備導入コスト，EC_i^tはt年目の世帯iにおけるエネルギーコスト，TC_i^tはt年目の世帯iにおける機器交換コスト，n_iは世帯iが存在した年数，NはT年間の延べ世帯数である．また，エネルギー効率についての評価指標Eを下記の式で計算する．

$$E = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100$$

$$E_{out} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(ED_i^t + QD_i^t) \qquad (3)$$

$$E_{in} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}(F_{Pi}^t + F_{FCi}^t + F_{GBi}^t)$$

ただし，E_{out}は社会全体でのエネルギー出力，E_{in}は社会全体でのエネルギー入力，ED_i^tはt年目の世帯iの電力需要，QD_i^tはt年目の世帯iの熱需要，F_{Pi}^tはt年目の世帯iの買電需要をまかなうために発電所に投入されるガスのエネルギー量，F_{FCi}^tはt年目の世帯iでCGSに投入されるガスのエネルギー量，F_{GBi}^tはt年目の世帯iでボイラーに投入されるガスのエネルギー量である．

6. モジュール交換型CGS設計の解候補の生成と評価

本章では，前章での数理モデルに基づいて解候補の生成と評価を試みる．2.2節で述べたように，理想状態の下での目的関数の値を目標とし，それとの比較により各シナリオの評価を行う．評価を踏まえて，考慮に入れるステークホルダーの範囲を拡大しつつ，シナリオを試行錯誤的に変更し，全体としての最適解に可能な限り近い設計解を探索することを試みる．なお，**図7**に本章の各節で述べるシナリオの評価指標の値とおおまかなパレート面の位置，シナリオ変更によるパレート面の変遷を示す．それぞれの図中のデータ点のラベルはシナリオ番号を示す．なお，本章の計算例で使用するエネルギー需要分布，CGS機器のコスト，エネルギーコストなどの数値は，関連資料や企業の技術者などへの調査を元にしたものである．一方で，モジュール交換コストなどについては，参考になるデータがなく，ある程度の仮定のもとに設定している．

6.1 理想状態のもとでの潜在的優位性の評価

まず，CGSがまったく普及していない状態，すなわち全ての世帯が電力需要を買電によってまかない，熱需要を各世帯のボイラーによってまかなう状態（シナリオ0）を想定する．ここで考慮に入れるステークホルダーは世帯のみである．社会全体での1世帯1年あたりのコストは200,176円，エネルギー効率は61.0％という結果であった（**図7**の“0：No CGS”）．

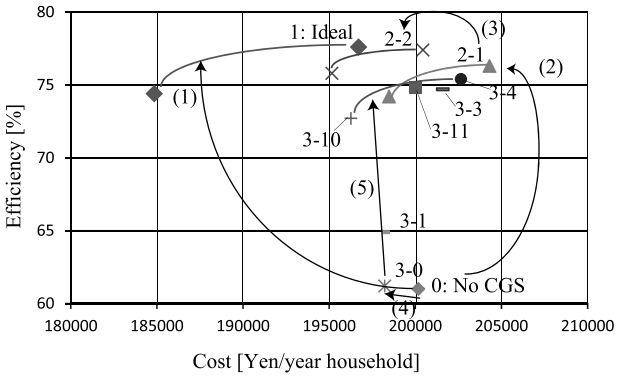

図7　シナリオの評価

表1　CGS機器の最適化

	Fuel cell output [kW]	Tank capacity [ℓ]
S1	0.28	53.0
S2	0.43	53.0
S3	0.57	53.0

次に，理想状態として，CGS機種数が100，モジュール交換コストが0で，CGS機器の製造コストが十分に下がっている状態（シナリオ1）を想定する．各世帯がコスト最適の判断をする場合とエネルギー効率最適の判断をする場合で，それぞれ単一目的のもとでの解を**図7－(1)**に示す．シナリオ0と比較すると，コストで1世帯1年あたりで約15,000円，エネルギー効率で約15％の向上が潜在的に見込めることがわかった．

6.2 CGS機器ラインナップの設計と評価

次に，全ての世帯がCGSを導入するという前提に立ち，CGS機器ラインナップの最適設計を行う．ここで考慮に入れるステークホルダーは世帯とCGS機器メーカー，サービスプロバイダーである．

6.2.1 3種類のCGS機器

はじめに，5.4節で述べたS_1，S_2，S_3の3つの代表点に対して，それぞれ最適なエネルギー供給能力を持つ3種類のCGS機器を設計する場合（シナリオ2-1）を想定して，各機器の最適化を行った．最適化計算にあたっては，最適化計算ツールOPTIMUS[†1]の遺伝的アルゴリズム（Differential Evolution）を用いた．**表1**に最適化の結果得られた各機器の仕様を示す．

この3機種のもとで，コスト最適の場合とエネルギー効率最適の場合で社会共有のシミュレーションを行ったところ，図7－(2)に示す結果が得られた．このシナリオ(2-1)では，エネルギー効率は目標とするシナリオ1における水準にほぼ達しているが，コストについては目標より1万円以上低い水準に留まっていることが分かった．コストを度外視するならエネルギー供給能力の大きな機器を導入すればエネルギー効率は改善できることから，シナリオ2-1の設計案では，機器の選択肢が少ないために，多くの世帯でオーバースペックの機器を導入する状態になっていると考えられる．またモジュール交換コストが高いために，モジュール交換を実施する世帯の割合が14.7％程度しかなく，社会共有が十分に実現できていないことも分かった．

6.2.2　燃料電池モジュールの細分化

シナリオ2-1では燃料電池発電機をひとつのモジュールとして考えていたが，前項の考察を踏まえ，燃料電池を構成するセルユニットをモジュールとして考え，需要変動の際にはセルユニットの枚数の調整のみで対応できるような設計を考える．本事例では，0.2kWの出力を持つセルユニットをモジュール化し，交換コストもシナリオ2-1の50％と想定する．これをシナリオ2-2としてコスト最適の場合とエネルギー効率最適の場合で社会シミュレーションを行った．シナリオ2-1と比較すると，コストは依然目標水準には及ばないもののやや改善が見られ，効率はほぼ目標水準に達していることが分かった(図7－(3))．またモジュール交換を実施した世帯の割合は96.4％にまで上昇しており，モジュールの社会共有が実現できていることが分かった．

6.3　補助金制度の設計と評価

最後に，CGS導入の判断を世帯に行わせるようにし，CGS普及を促進させるように補助金制度を設計することを考える．ここで，CGS設計問題についてはシナリオ2-2の解を採用し，考慮に入れるステークホルダーとして行政を加える．

6.3.1　補助金なし

補助金設計問題のシナリオとして，まずは補助金を導入しない場合(シナリオ3-0)を想定した．この場合，補助金がない場合はわずか1.8％の世帯がCGSを導入するに留まり，コスト，エネルギー効率の改善もほとんど見込めないことが分かった(図7－(4))．

6.4　補助金制度の設計と評価

最後に，シナリオ2-2を与条件としてCGS導入の判断を世帯に行わせるようにし，CGS普及を促進させるように補助金制度を設計することを考える．補助金を導入しない場合(シナリオ3-0)，CGS導入世帯に年額一定額を補助する場合(シナリオ3-1～3-4)，補助金額を5年ごとに減額していく場合(シナリオ3-5～3-13)を想定し，それぞれシミュレーションを行った．表2は，シナリオの内容と，それぞれのシナリオの下での補助金額も含めたコストとエネルギー効率，およびCGSを導入した世帯の割合[％]を示す．

表2　補助金制度設計シナリオの評価結果

Scenario	Subsidy system		C	E	Intro. Ratio
	Yearly	Reduction			
3-0	0	0	198,221	61.2	1.8
3-1	1,000	0	198,126	64.9	18.0
3-3	5,000	0	201,590	74.7	89.1
3-4	7,000	0	202,649	75.4	93.5
3-5	3,000	1,000	197,563	72.2	81.2
3-6	3,000	2,000	196,449	71.6	81.6
3-7	3,000	3,000	196,802	71.3	83.7
3-8	5,000	1,000	198,666	73.9	80.9
3-9	5,000	2,000	197,072	73.1	81.3
3-10	5,000	3,000	196,262	72.7	81.1
3-11	7,000	1,000	200,025	74.8	86.6
3-12	5,000	2,000	198,109	74.3	81.9
3-13	7,000	3,000	198,351	73.6	82.0

補助金がない場合はわずか1.8％の世帯がCGSを導入するに留まり，コスト，エネルギー効率の改善もほとんど見込めない(図7－(4))．表2により，補助金によって普及が促進されるが，補助金額の負担が大きくなり社会全体のコストは増えていることが確認できる．

表2によると，コスト面では，初期の普及を補助金で後押して製造コストを下げ，普及後に補助金をすみやかに打ち切る制度(シナリオ3-10)が良く，エネルギー効率面では，CGSを普及させるために，多くの補助金を出す制度(シナリオ3-4)が良いことが分かる．シナリオ3-0と比較すると，こうした補助金制度によって，同じ水準のコストで13～14％のエネルギー効率の改善が見込めることが分かる(図7－(5))．

7.　まとめ

本報では，システムの閉鎖性を前提とするシステム工学の課題を解説し，共創のしくみとシナリオの概念に基づいて，その課題に対応するための新しいシステムの設計方法論を紹介した．この設計方法論は，超システムを構成する複数のステークホルダーの挙動に着目して設計問題をモデル化し，共創のし

くみを通じて全体最適を行うことを考えるものである．具体的な検討例として，モジュールの交換が可能な家庭用燃料電池CGSの設計問題を取り上げた．この設計方法論においては，シナリオとマルチエージェントシミュレーションを活用し，システム群の共創のしくみによって全体最適を行った．設計例題において，提案した方法論に基づいて有望な設計解の検討を行うことができた．これにより提案した方法論の有効性を確認することができた．

なお，本研究で用いたマルチエージェントシミュレーターartisocは株式会社構造計画研究所から貸与して頂いた．ここに謝意を表する．

†1　OPTIMUSはサイバネットシステム株式会社の登録商標である．

参考文献

1）日本規格協会：品質マネジメントシステム－基本及び用語，JIS Q9000,(2006).

2）日本規格協会：オペレーションズリサーチ用語，JIS Z 8121,(1967).

3）岸光男：機械システム入門シリーズ6システム工学，共立出版(1995).

4）Jamshidi, M.: Systems of Systems Engineering : Innovations for the Twenty-First Century, Wiley (2008).

5）Alcamo, J.: Scenarios as Tools for International Environmental Assessments, Environmental Issue Report No. 24, European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark,(2001).

6）山影進：人工社会構築指南－artisocによるマルチエージェント・シミュレーション入門(人工社会の可能性)，書籍工房早山(2007).

7）日経エレクトロニクス・日経ものづくり共同編集：燃料電池2005－実用化を目前にしてヒートアップする携帯機器，家庭用コージェネの開発競争－, 日経BP出版センター(2005).

8）Wilson, B.: Systems: Concepts, Methodologies, and Application, John Wiley & Sons Ltd.(1990), (邦訳：B. Wilson, システム仕様の分析学, 根来龍之 訳, 共立出版,(1996)).

9）上田完次：創発とシンセシス：人工物デザインから価値共創へ, 設計工学, 42, 10(2007)，574.

10）三輪敬之：今，必要なこと，それは「共創」, 計測と制御，51，11(2012)，1011.

11）三宅美博：システム設計における共創という姿勢，計測と制御，51，11(2012)，1037.

12）上田完次：共創とは何か，培風館(2004).

13）山影進：マルチエージェントシミュレーションの可能性：社会科学の立ち位置から, 設計工学, 47，12(2012)，1.

14）吉村進，藤井秀樹：知的シミュレーションによる環境調和型人工物と社会のデザイン，設計工学，47，12(2012)，9.

15）瀧澤重志：動的ネットワークによる避難モデルとマルチエージェントの融合，設計工学，47，12(2012)，24.

16）村上朝之：先進的エネルギー・社会システムの具現化に資するハードな科学とソフトな科学の融合シミュレーション，設計工学，47，12(2012)，31.

17）下田吉之，山口幸男，岡村朋，谷口綾子，山口容平：家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生 家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測，エネルギー・資源学会論文誌，30，3(2009)，181.

18）藤本卓也，山口容平，岡村朋，下田吉之: 余剰電力固定買取・全量買取のもとでの太陽光発電の経済性比較と普及影響評価，エネルギー・資源学会論文誌，32，3(2011)，179.

19）Sahin, F., Jamshidi, M., and Sridhar, P.: A System-of-Systems Simulation Fremework and its Applications, in Jamishidi, M. ed., System of Systems Engineering: Innovations for the Tewnty-First Century, Wiley,(2008), 107.

20）Grosse, I. R., Milton-Benoit, J. M., and Wileden, J. C.: Ontologies for Supporting Engineering Analysis Models, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 19, 1(2005), 1.

21）ASME V&V 10-2006, ed.: Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, PTC 60 Committee on Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, The American Society of Mechanical Engineers(2006).

22）池田和明，今枝昌宏：実践シナリオ・プランニング，東洋経済新報社(2002).

23）Carroll, J. M.: Making Use: Scenario-based Design of Human-Computer Interactions, The MIT Press(2000),(邦訳：J. M. Carroll: シナリオ

に基づく設計－ソフトウェア開発プロジェクト成功の秘訣－，郷健太郎訳，共立出版）.
24）木下裕介，廣崎真希，水野有智，和田春菜，福重真一，梅田靖：持続可能社会に向けた長期戦略立案のためのビジネス戦略シナリオの設計支援，日本機械学会論文集Ｃ編，78，796(2012)，3866.
25）伊東弘一，横山良平：コージェネレーションの最適計画－インテリネント・フレキシブル・コージェネレーションを目指して－，産業図書株式会社(1990).
26）生協総合研究所：わたしたちのくらしとエネルギー消費調査報告，日本生活協同組合連合会(2002).
27）Fujita, K. and Kuriyama, Y.: Technological Issues toward Environmental Excellence of Socially Exchangeable Artifacts for Fluctuating Distributed Demands, Proceedings of 6th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign2009) (2009), 607.
28）植田辰洋：ボイラーボイラおよび復水器，朝倉書店(1955).

野間口　大

2002年3月　東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了．博士(工学)．2003年4月，大阪大学大学院工学研究科助手．2013年3月より現職．研究分野は設計支援のための知識管理手法，リスクマネジメント手法など．設計工学会，日本機械学会，ASME，The Design Society各会員．

栗山　裕

2011年3月　大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了．修士(工学)．2011年4月　株式会社野村総合研究所入社．証券システムの設計・開発業務に従事．2014年4月より岡山大学医学部医学科．

藤田　喜久雄

1990年　大阪大学大学院工学研究科産業機械工学専攻博士後期課程修了．工学博士．大阪大学工学部助手，講師，助教授を経て，2002年8月より現職．研究分野は，設計学・設計方法論，設計のための情報システム，設計最適化など．設計工学会，日本機械学会，American Society of Mechanical Engineers(ASME)，The Design Society各会員．