持続可能な製造業の実現に向けた 持続可能社会シナリオシミュレータの開発(第4報)*

—what-if分析による派生シナリオの作成手法—

木下裕介** 水野有智*** 福重真一** 梅田 靖**

Development of Sustainable Society Scenario Simulator toward Sustainable Manufacturing (4th Report)
—A Method for Drawing Scenario Variants Based on What-if Analysis—

Yusuke KISHITA, Yuji MIZUNO, Shinichi FUKUSHIGE and Yasushi UMEDA

Designing sustainability scenarios is a promising approach to describing visions and transitions of the manufacturing industry targeting a sustainable society. However, computational assistance in designing such scenarios is not sufficiently provided in the current scenario research. This paper proposes a method for drawing scenario variants by executing what-if analysis of existing scenarios in order to explore different possible futures in the scenario design process. To support composing scenario variants, the method defines scenario rationales that should be changed in the process of what-if analysis. Results of a case study involving an existing sustainability scenario show that the method successfully helps draw a new scenario variant by modifying a part of the rationales of the original scenario. Consequently, 82% of the texts of the new scenario are described from the original scenario.

Key words: sustainable manufacturing, scenario design, what-if analysis, scenario variant, sustainability

1. 緒 言

持続可能社会の構築に向けて、製造業は従来の大量生産型システムから持続可能なものづくりを実現する産業構造に変革することが求められている¹⁾。しかし、資源枯渇や地球温暖化を含めた種々の問題の存在は、日本の製造業を取り巻く環境をよりいっそう不確実なものにしている。このような状況の中で製造業の将来像を議論するためには、シナリオの作成が有効なアプローチである。一般にシナリオは、将来の状況とそこに至るまでの道筋を文章として記述したものであり、その本質は、不確実な将来に対処するために起こりうる様々な将来を描くことにある²⁾。持続可能社会に向けたシナリオの例として、温室効果ガス排出シナリオ³⁾、2050年日本低炭素社会シナリオ⁴⁾が有名である。しかし、日本の製造業が目指すべき持続可能なものづくりの将来像およびそこに至る道筋は、依然として不明瞭なままである。これらを明らかにしていくためには、将来の製造業に関して様々な状況を想定したシナリオを描く必要がある。

シナリオを描く際には、将来のイメージを徐々に具体化するために、シナリオ作成に携わる参加者の間で問題提起、シナリオの記述の詳細化、記述の評価・改訂といったサイクルを繰り返す必要がある⁵⁾。このような行為を、ここでは「シナリオ設計」と呼ぶ。本報では、シナリオ設計を実行するときに既存のシナリオに基づいて様々な将来像の探索を可能とするために、既存のシナリオに対するwhat-if分析によって派生シナリオの作成を支援する手法を提案する。シナリオのwhat-if分析とは、既存シナリオの前提条件の一部を変化させることによって、そこに元々描かれていた将来がどのように変化するかを調べる技法である⁶⁾。本報で提案する手法では、what-if分析で変更する前提条件として、著者らが第1報⁷⁾で定式化したシナリオの「基底」を利用する。シナリオ

の基底は、シナリオの結論を導出するために使われる根拠のうち、その結論と因果関係を保持する始点の集合と定義している⁷⁾。それゆえ基底を変化させると、対応する結論も因果関係に基づき必然的に変化する。さらに、既存シナリオを用いた派生シナリオの記述を支援するために、シナリオの基本パターンを定義する。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では持続可能社会に向けたシナリオ作成の既存研究について述べる。第3章では、既存シナリオのwhat-if分析に基づく派生シナリオの作成手法を提案する。第4章では、提案した手法をシステムとして実装する。第5章では、ハイブリッド車の普及シナリオに対してwhat-if分析を適用した例題を示す。第6章では例題の結果から提案した手法の有効性を検証し、第7章で本論文の結論を述べる。

2. 持続可能社会に向けたシナリオの設計支援

2.1 シナリオ作成に関する既存研究

シナリオを用いた企業の戦略策定の手法は、1970年代初頭に石油メジャーのロイヤル・ダッチ・シェル社が使い始めたと言われている⁸⁾。企業のビジネス戦略を立案するためにシナリオを利用する手法は広くシナリオプランニング⁹⁾と呼ばれており、そこではシナリオの作成手順が数多く提案されている。それらのシナリオ作成手順では、多くの場合、企業の外部環境にとって将来的に不確実な要因を洗い出し、その中から抽出した特に影響の大きな要因（通常は、2～3個）の状態を変化させることによって、代表的ないくつかの将来像をシナリオとして描く¹⁰⁾。

近年では、持続可能社会像の描写にシナリオを利用する研究もさかんであり、例えばJägerら¹¹⁾は叙事的なストーリーと数理モデルに基づいた定量分析との組み合わせによるシナリオ作成手法を提案している。実際に、これまでに作成された持続可能社会に向けたシナリオ（例えば、IPCCのシナリオ³⁾）には、ストーリーを表す文章とそれを根拠づけるためのシミュレーションの組み合わせでシナリオを構成することが多いという特徴がある¹²⁾。

* 原稿受付 平成24年3月19日

** 正会員 大阪大学大学院 (大阪府吹田市山田丘2-1)

*** 学生会員 大阪大学大学院

2.2 Sustainable Society Scenario (3S) Simulator

1章で述べたシナリオ設計のサイクルを実行しようとするとき、シナリオ設計者の間でシナリオを合理的に理解しながらシナリオを記述するためには、シナリオの前提条件とそこから得られる結果の関係を含めたシナリオの論理構造を明確化する必要がある。しかし、既存の研究ではシナリオの作成手順は数多く提案されているものの、一般にシナリオは文章として記述されており、その論理構造は非明示的である。また、既存のシナリオにはしばしば根拠づけのためにシミュレーションが利用されるが、シナリオは文章として記述されていて関連するシミュレータと接続されていないため、シナリオ上で条件を変更したときのシミュレーションを再実行することができないという課題もある。

これらの課題を解決するため、著者は持続可能社会に向けたシナリオの設計を統合的に支援するシステムとしてSustainable Society Scenario (3S) Simulatorを提案している¹³⁾。3S Simulatorの機能は、(1) シナリオの構造化、(2) シナリオとシミュレータの接続、(3) 新たなシナリオの作成支援、(4) 既存シナリオの分析支援、(5) 既存のシナリオおよびシミュレータのアーカイブ化の5つである⁷⁾。これらの機能の実装に向けて、第1報⁷⁾では計算機上におけるシナリオの表現方法として、シナリオの構造的記述法(2.3節参照)を提案した。第2報¹⁴⁾では、シナリオ上でシミュレーションの再実行を可能とするために、シナリオとシミュレータを接続する手法を提案した。この手法では、シナリオの文章とシミュレータの間でデータを交換する仕組みを開発した¹⁴⁾。第3報¹⁵⁾では、新たなシナリオの作成をフォアキャスト的なアプローチにより支援する手法を提案した。本報では、3S Simulatorで既存シナリオの分析を支援するために、第1報および第2報の成果を用いながらwhat-if分析による派生シナリオの作成手法を提案する。

2.3 シナリオの構造的記述法⁷⁾

持続可能社会に向けたシナリオには、将来の状況を想定する際に仮定や論理的な飛躍が必然的に含まれる。このようなシナリオを合理的に理解するため、シナリオの構造的記述法ではシナリオをノードとリンクからなる有向グラフとして表現することにより、シナリオの論理構造を明示的に記述する。ここで、ノードはシナリオの構成要素、リンクはそれらの間の関係を表す。一般にシナリオは、サブシナリオ、シナリオの文章、シミュレーションというように異なる粒度の要素から構成されるため、それらを表現するために次の4つのレベルでシナリオを構造化する。すなわち、(1) シナリオを構成する各サブシナリオを表すScenario Level、(2) 各サブシナリオの文章を構成する節 (clause) の間の論理関係を表すExpression Level、(3) 各サブシナリオにおける語句間の関係を表すWord Level、(4) シナリオを根拠付けるために利用されるシミュレータとその入出力データを表すData Levelの各レベルを定義する。このようなシナリオの構造化方法に基づき、シナリオに記述された論理の筋道を明確化する利点としては、シナリオの記述における前提条件とそこから得られる結果の対応関係を明確化できること、シナリオの論理的な記述と論理的に飛躍を含む記述を明確に区別できること、が挙げられる。

3. What-if分析に基づく派生シナリオの作成支援手法

3.1 アプローチ

本報では、シナリオ設計の支援の一部として、既存シナリオに対するwhat-if分析に基づいて新たな派生シナリオを作成する手法を提案する。既存の持続可能社会に向けたシナリオの多くはシミュレータを利用して描かれているため、本報ではシミュレータ

Fig. 1 Extracting “base” based on logical sequences

を利用した既存シナリオのwhat-if分析を対象とする。それにともない、本報におけるシナリオ表現では構造的記述法のScenario, Expression, Dataの3つのレベルを用いる(2.3節参照)。

シナリオのwhat-if分析を実行するとき、既存のシナリオから前提条件を変化させた場合の派生シナリオを描く手順が既存研究では十分に形式化されていない。この課題に対して、本報ではwhat-if分析で変更すべき前提条件の候補を抽出するために、第1報⁷⁾で定式化したシナリオの基底(1章参照)を利用する。ここで基底を利用する理由は、基底を変化させると常に、その基底から導出した結論も因果的に変化するため、結果的に元の結論と異なる結論を持った派生シナリオを作成することができるためである。シミュレータを利用したシナリオでは、一般にシナリオの結論はシミュレーション結果に基づいて導出されるが、そのシミュレーションの全ての入力条件はシナリオの基底に含まれる。

what-if分析の実行において、既存シナリオの前提条件を変化させたときのシミュレーションを実行する際には、第2報¹⁴⁾で提案したシナリオとシミュレータを接続した動的シナリオを利用する。動的シナリオとは、シナリオ上でシミュレーション条件を変えるとシミュレーションが実行され、その結果が動的に反映されるシナリオである¹⁴⁾。さらに本報では、既存シナリオから派生シナリオの作成を支援するためにシナリオの基本パターンを定義する。

3.2 シナリオの基底を用いたwhat-if分析

第1報⁷⁾では、シナリオの基底をシナリオの構造的記述法に基づいて定義した。一般に、シナリオの結論を導出する前提条件は、シナリオの文章とシミュレーションの両方を使って表される。それゆえ、その前提条件の一部であるシナリオの基底の表現には、シナリオの構造的記述法においてシナリオ文章の論理関係を表すExpression Levelと、シミュレータとその入出力データを表すData Levelの2つを用いる⁷⁾。構造的記述法を用いてシナリオの基底を抽出するイメージを図1に示す。この図に示すように、リンクを因果関係と非因果関係の2種類に区分することによって、結論と因果関係を保持する前提条件のうち始点ノードとなるものを基底と定義した⁷⁾。その一方で、一般には図1に示すように、基底以外にも、結論と因果関係を持たないものの結論の導出に際して何らかの影響を与える前提条件が存在する。これらの前提条件はいわば結論に対する傍証であって、結論が真に生じるための十分条件ではない。本報では、これらの前提条件をwhat-if分析で変更する対象としない。本報では、結論と非因果的な前

Fig. 2 Example of structuring scenario texts

提条件を変化させてシナリオ設計者の自由な発想により新たな結論を導くことは、既存シナリオのwhat-if分析による派生シナリオの作成ではなく、新たなシナリオの作成であると位置づける。

シナリオの構造的記述法に基づき、短い文章をExpression Levelで構造化した例を図2に示す。仮定を表すノード(A)は、結論を表すノード(B)と(C)をそれぞれ導出する前提条件であるが、これらの導出関係には因果関係の有無の点で違いがある。つまり、「もし日本がすべての原子力発電所を操業停止にすると」という仮定(A)から、「発電用の化石燃料消費量は増加する」という結論(B)を導出する過程には因果関係 (causality) がある。その一方で、「日本の製造業の大部分が海外に移転する」という結論(C)を導出する過程には因果関係がないため、ここではその導出関係を論理的な飛躍 (logical_jump) として表現した。それゆえ、仮定(A)は結論(B)に対する基底であるが、結論(C)に対する基底ではない。ここでwhat-if分析を行うには、基底である仮定(A)を変更することにより、結論(B)とは異なる結論を導出する。例えば、仮定(A)の記述を変更して、「もし日本が原子力発電所をひとつも操業停止にしないとすれば」という新たな仮定(A')を想定したとき、この変更は結論(B)の記述内容に因果的に影響を与える。すなわち、仮定(A)と結論(B)の間に存在する因果関係を保持したまま、仮定(A')から新たな結論(B')を得る。新たな結論(B')の記述内容には自由度があるため、シナリオ設計者が文脈に基づいてその詳細な記述内容を決める。結論(B')の一例として、「発電向けの化石燃料消費量は増加しないだろう」という記述が考えられる。一方で、原子力発電所の操業 (仮定A) と日本の製造業の国外移転 (結論C) の間には因果関係がなく、本報ではこれらを上述の理由によりwhat-if分析の対象としない。

基底の中からwhat-if分析で変更する前提条件を選択する段階では、既存シナリオの結論に最大の変化をもたらす前提条件を特定するために、(1) ある前提条件が結論に与える影響度と、(2) その前提条件が持つ不確実性の幅、の2つの積が相対的に大きな前提条件を選択する。上記の(1)、(2)は、シナリオの設計者が基底を構成する個々の前提条件に対してそれぞれ評価する。ここで、(1)の影響度はシミュレーションを用いた感度分析により定量的に評価し、(2)の不確実性はシナリオ設計者間の議論に基づいて評価する。ただし、もし基底に含まれる前提条件が図2の仮定(A)のように、結論を定性的に導出する場合には、(1)の影響度もシナリオ設計者間の議論により評価する。

3.3 シナリオの基本パターン

本報では、既存シナリオのwhat-if分析による派生シナリオの作成を支援するために、シナリオの基本パターンを定義する。このとき、既存シナリオの記述を可能な限り再利用して派生シナリオの記述を効率化するとともに、既存シナリオと派生シナリオにおける前提条件および結論の差異を明示するために、基本パターンではそれら2つのシナリオに共通の記述と異なる記述を明確に区別する。そのために本報では、シナリオの構造的記述法の

Fig. 3 Basic pattern of scenario structure involving scenario variants

Scenario Level⁷⁾を用いて、既存シナリオAから派生シナリオA'を作成したときのシナリオ構造の基本パターンを図3で定義する。

Scenario Levelで扱うノードの種類として、scenarioノードは1本の(サブ)シナリオを表し、scenario_componentノードは(サブ)シナリオの一部であり、なおかつ記述内容の意味に応じたサブシナリオの記述のひとかたまりを表す。つまり、scenario_componentノードは、既存の様々なシナリオの分析結果に基づいて定義した6種類 (problem, hypothesis, simulation, result, discussion, conclusion) のいずれかに対応する記述のかたまりを表す⁷⁾。リンクの種類として、consist_ofリンクはシナリオとサブシナリオの関係、part_ofリンクは(サブ)シナリオとその構成要素であるscenario_componentノードの関係を表す。また、compareリンクは、2本のサブシナリオが比較される関係にあることを表す。

図3の基本パターンでは、scenarioノード(I)はシナリオ全体を表し、そのサブシナリオであるscenarioノード(II), (III)はそれぞれ既存シナリオA、派生シナリオA'を表す。ここで、what-if分析の定義によりサブシナリオAとA'はそもそも相互に比較すべきものなので、それらをcompareリンクで接続する。さらに、それらのサブシナリオに共通な記述として、ブロック(i)は共通の問題設定と仮定を、ブロック(iv)はシナリオ全体の考察と結論を記述したscenario_componentノードを表す。ブロック(ii), (iii)は、サブシナリオA、A'に固有の(サブシナリオA、A'に共通でない)記述を表す。これらのうち、ブロック(i), (ii)は既存シナリオAの記述を再利用する部分であり、残りのブロック(iii), (iv)は派生シナリオA'を作成するために新たに記述が必要な部分を表す。

本手法では、3.2, 3.3節で述べた考え方に基づいて、what-if分析により既存シナリオから新たな派生シナリオを作成する。その具体的な手順については4.2節で述べる。

4. What-if分析による派生シナリオ作成支援システム

4.1 システム構成

既存シナリオに対するwhat-if分析の実行と派生シナリオの作成を支援するためのシステムを図4に示す。本システムは5つの要素 (シナリオ構造化支援ツール、シナリオ視覚化ツール、Dataset Manager, Simulator Database, what-if分析ツール) から

Fig. 4 What-if Analysis Support System

構成する。シナリオ構造化支援ツールは、シナリオ設計者がシナリオの構造的記述法（2.3節参照）に基づいてシナリオを構造化する操作を支援する。具体的には、シナリオの構造化にはXML (Extensible Markup Language)¹⁶⁾を用いることとし、シナリオの構造的記述法で定義したノードとリンクの種類（ノードとリンクの種類の例は図3を参照）をXMLのタグ情報として元のシナリオに付加する。シナリオ視覚化ツールは、構造化したシナリオを論理構造グラフなどの形式で視覚化する。Dataset ManagerとSimulator Databaseは、動的シナリオ（3.1節参照）を作成および利用する際に、シナリオとシミュレータ間のデータ交換を支援する¹⁴⁾。what-if分析ツールは、既存シナリオへのwhat-if分析を通じた派生シナリオの作成を支援するために、既存シナリオの基底を抽出して論理構造グラフ上でそれらを明示するとともに、図3の基本パターンに基づくシナリオ構造を生成する。

4.2 派生シナリオの作成手順

シナリオ設計者が、本システムを用いて既存シナリオから派生シナリオを作成する手順は以下のとおりである。

1. 既存シナリオの基底抽出: シナリオ設計者が、what-if分析により変更したい既存シナリオの結論を任意に選択する。このとき、変更すべき前提条件の候補としてwhat-if分析ツールがその結論に対する基底を抽出する。基底の抽出には第1報⁷⁾で提案したアルゴリズムを利用する。
2. 変更箇所の選択: シナリオ設計者が手順1で抽出した基底に含まれる個々の仮定を、(1) 結論に対する影響度と、(2) 仮定自身の不確実性の観点から評価し、それらが相対的に大きな仮定を変更箇所として選択する。(1)の影響度を定量的に評価するために、シナリオ設計者は動的シナリオを用いることにより感度分析を行う。感度分析では、シミュレーションの個々の入力値を変化させたときにシミュレーション結果が変化する度合いを相互に比較する（感度分析の例を5.2節に示す）。また、(2)の評価はシナリオ設計者間の議論に基づいて決定する。
3. 派生シナリオの作成: what-if分析ツールが図3の基本パターンに基づいてScenario Levelにおけるシナリオ構造を作成する。このとき、what-if分析ツールは自動的に既存シナリオのsimulation, result, discussion, conclusionの各scenario_componentノードに含まれる記述をブロック(ii)の対応するコンポーネントに移動させるとともに、既存シナリオのproblem, hypothesisコンポーネントに含まれていた記述をブロック(i)の対応するコンポーネントに移動させる。これは、what-if分析では既存シナリオの仮定の大部分を再

利用し、一部のみを変更するという想定に基づいている。シナリオ設計者はシナリオ構造化ツールを使って、ブロック(iii)の各コンポーネントに新たに記述を加えることにより、派生シナリオを作成する。ブロック(iii)のhypothesisコンポーネントには、シナリオ設計者が手順2で選択した変更箇所について派生シナリオ独自の仮定を記述する。この仮定に基づき、動的シナリオを利用して派生シナリオのシミュレーションを実行し、その結果をブロック(iii)のresult, discussion, conclusionの記述に反映させる。上記のように記述した派生シナリオの内容に基づいて、シナリオ設計者はシナリオ構造化ツールを用いて、既存シナリオに固有の問題設定と仮定のみをブロック(i)からブロック(ii)のproblem, hypothesisコンポーネントに移動させる。

4. シナリオ全体の考察・結論の記述: 最後に、既存シナリオと派生シナリオの記述に基づいて、シナリオ設計者がシナリオ構造化支援ツールを用いて、シナリオ全体の考察と結論をブロック(iv)の各コンポーネントに記述する。

5. 実行例: HEV Diffusion Scenarioのwhat-if分析

本章では、提案した手法の有効性を検証するために4.2節の手順をHybrid Electric Vehicle (HEV) Diffusion Scenario¹⁷⁾に適用する。このシナリオは、製品普及シミュレータを用いて日本のハイブリッド車 (HEV) 普及台数を2050年まで推計している。以下では、HEV Diffusion ScenarioのサブシナリオであるBase Case Scenarioにwhat-if分析を実行して派生シナリオを作成する。

5.1 Base Case Scenarioの基底抽出

Base Case ScenarioをExpressionおよびData Levelで構造化した結果の一部を、論理構造グラフとして図5に示す。凡例に示すとおり、これら2つのレベルでは合わせて9種類のノードと12種類のリンクを定義している（詳細は第1報⁷⁾、第2報¹⁴⁾を参照）。ブロック(A)と(C)はBase Case Scenarioのシナリオ文章を構造化した部分、ブロック(B)はシミュレーションを構造化した部分を表す。ここで、システムはシナリオの構造化を支援するものの、ノードとリンクの種類の選択はシナリオ設計者の判断に委ねられる。つまり、シナリオ設計者はシナリオの記述の意味を理解し、適切なノードとリンクの種類を選択することによりシナリオの構造化を進める。

いま、Base Case Scenarioの結論のうちノード(a)に着目する。ここでは、「2015年には日本で150万台のハイブリッド車が普及する」と記述されている。what-if分析ツールが抽出した結論(a)の基底の一部を図5に“+”印付きのノードとして表示し、これらの基底

Table 1 List of the base of Base Case Scenario (partially)

Node	Node type	Contents of Node
(b)	dataset	While Node (b) consists of 29 input parameters, only one input parameter called “learning curve coefficient on HEVs” is part of the base.
(c)	hypothesis	The gas mileage of mini cars will not be improved by introducing hybrid electric engines.
(d)	hypothesis	The average expense was 10,600 JPY (=96 USD) per month per car.
(e)	hypothesis	For gasoline mileages, we set 20 km/L for HEV and 12 km/L for GV (gasoline vehicle).

Fig. 5 Extracting the base of Base Case Scenario in Expression and Data Levels (partially)

の内容を表1にまとめる。表1の基底は、入力データそのもの (Data Levelのノード(b)) か、もしくはシミュレーションの入力データ(b)の値を設定するための根拠を記述した文章 (Expression Levelのノード(c)~(e)) の2種類に分類できる。ここで、入力データ(b)は29個のパラメータから構成される (例えば、ハイブリッド車の燃費や価格など) が、これらの個々の入力パラメータと Expression Levelのノードの関係はシステムが管理している。入力データ(b)の中でも「ハイブリッド車の学習曲線定数」(ハイブリッド車の将来生産コストにおける学習効果を規定するパラメータ) だけが Expression Levelのノードと因果関係で接続されていないため、システムは、そのパラメータを表現する Data Levelのノード1個を基底の一部として抽出した (表1のノード(b)を参照)。

結果として、結論(a)の基底はすべてシミュレーション条件の根拠であり、その内訳は28個の入力パラメータに対応する計14個の Expression Levelのノードと、1個の入力パラメータに対応する1個の Data Levelのノードであった。

5.2 変更すべき仮定の選択

基底を構成する個々の仮定が結論(a)に与える影響度を評価するため、著者らはシステムを用いて、シミュレーションの入力データ(b)を構成する29個のパラメータに対する感度分析を実施し

た。このうち、表1の基底(b)~(e)に対応したパラメータに対する分析結果を表2に示す。この分析では、結論(a)への影響度を測る感度係数を次式で定義した。

$$Sensitivity^i(\%) = \frac{|HEV_{1.1}^i - HEV_{ref}|}{HEV_{ref}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 HEV_{ref} と $HEV_{1.1}^i$ は、2015年時点のBase Case Scenarioにおけるハイブリッド車の累積普及台数 (150万台) と入力パラメータ i の値をBase Case Scenarioと比べて1.1倍にしたときのハイブリッド車の累積普及台数をそれぞれ表す。

表2の結果より、感度係数が最も大きな入力パラメータは「市場におけるハイブリッド車の潜在的な最大普及台数」である。Base Case Scenarioではこの値の設定根拠は仮定(c)であり、ここでは小型乗用車 (軽自動車) の燃費はハイブリッド車の導入によって向上しないと仮定している (表1参照)。ここから、Base Case Scenarioでは図5の仮定(f)で、「軽自動車のハイブリッド車

Table 2 Sensitivity analysis on the input data of the simulation

No.	Input parameter	Associated base node	Original value	Sensitivity ⁱ (%)
1	Learning curve coefficient on HEVs	(b)	0.152	0.32
2	Market maximum diffusion of HEVs	(c)	3,700	10.30
3	Gas Expenses in 2050 relative to 1998	(d)	1	0.06
4	GV mileage	(e)	12	3.94
5	HEV mileage		20	1.65

Fig. 6 Comparison between the two sub-scenarios

は市場に投入されない」と想定している。しかし、著者らは5.3節で述べるようにこれらの仮定には不確実性があるため変更の余地があると判断し、仮定(c)をwhat-if分析の変更対象とした。

5.3 派生シナリオの作成

まず、システムが図3の基本パターンに基づいてScenario Levelにおけるシナリオ構造を生成した。このとき、著者らは図3のブロック(iii)の記述を以下のように作成した。

派生シナリオを作成するために図5の仮定(c)を変更する。この変更では軽自動車にハイブリッド化することで燃費を改善することができ、結果として軽自動車にもハイブリッド車が普及すると想定する。そのような派生シナリオをMarket Expansion Scenarioと名づける。著者らがシナリオ構造化ツールを使って記述した派生シナリオの仮定および結論（図3のブロック(iii)の一部に相当）を表3に示す。すなわち、派生シナリオでは仮定(c)および(f)を以下のように変更した。

表3に示すとおり、派生シナリオのhypothesisコンポーネントでは軽自動車ですでにいくつかハイブリッド車のモデルが市場に出回っていることを指摘し、将来的には経済的な優位性から一人乗りもしくは二人乗りの小型ハイブリッド車が普及すると想定した。その場合、2050年にかけて2006年時点の軽自動車の保有台数1,500万台のうち1,300万台分がハイブリッド車に置き換わる可能性があるとして、2050年の市場におけるハイブリッド車の潜在的な最大普及台数をBase Case Scenarioの3,700万台と合わせて合計5,000万台になるとした。この場合、動的シナリオを利用してシミュレーションを再実行することにより図6に示すシミュレーション結果を得た。この結果に基づき、派生シナリオの結論として、「Market Expansion Scenarioでは、ハイブリッド車が2015年に210万台、2025年に1,080万台、2050年に4,420万台になる」と記述した（表3参照）。

一方で、図3のブロック(i), (ii)に対応する記述は、Base Case Scenarioで書かれていた記述を再利用した。

5.4 シナリオ全体の考察・結論の記述

図3のブロック(iv)におけるシナリオ全体の考察では、図6の結果に基づいて、「2つのサブシナリオの比較から、2015年にMarket Expansion ScenarioではBase Case Scenarioよりも1.4倍のハイブリッド車が普及する」と記述した（表4参照）。さらに考察ではMarket Expansion Scenarioが実現する条件として、(1) バッテリーが軽量になり小型ハイブリッド車の燃費が現在の小型ガソリン車に比べて大きく向上すること、(2) 経済的な理由により消費者が一人乗りまたは二人乗りの自動車を好むようになること、という条件を記述した。シナリオ全体の結論には、表4に示すとおり、「2つのシナリオの比較からハイブリッド車の潜在的な市場は普及に大きな影響を与える」と記述した。

6. 考 察

5章で示した実行例の結果より、本報で提案した手法ではwhat-if分析の手順を形式化することによって、既存シナリオから派生シナリオを作成するための一連のサイクル（基底の抽出、基底の変更、シミュレーションの再実行を含む派生シナリオの作成、シナリオ全体の考察と結論の記述）を支援できることが示された。ここで重要なことは、本手法の意義は、単にシミュレーションを再実行してその結果を得るだけでなく、既存シナリオから派生シナリオを作成するまでの論理の筋道をシナリオとして明示的に記述できることにある。すなわち、本手法を用いた構造的なシナリオの記述を通して、「どのような意図で既存シナリオから派

Table 3 Drawing Market Expansion Scenario by modifying Node (c) (partially)

Scenario component in Block (iii)	Descriptions of Market Expansion Scenario
hypothesis	Although Base Case Scenario assumes that HEVs do not emerge in the market of mini-vehicles with displacement of less than 660cc, some models for HEV have been marketed (Suzuki 2003, Daihatsu Automobile Co., Ltd. 2010). In the future, mini-vehicles for HEVs, particularly single- or twin-seater vehicles, would become popular because of their economic rationality. In Market Expansion Scenario, we set the potential market of HEVs in 2050 as 50 million by adding 13 million mini cars to 37 million non-mini cars, while the number of personal cars of Japan in 2006 is 57 million; in detail, 15 million mini cars and 42 million non-mini cars (Japan Automobile Manufacturers Association, 2008).
conclusion	In Market Expansion Scenario, HEVs disseminate 2.1 million in 2015, 10.8 million in 2025, and 44.2 million in 2050, respectively.

Table 4 Descriptions of overall discussions and conclusions (partially)

Scenario component	Descriptions
discussion	The comparison between the two sub-scenarios shows that, by 2015, HEV diffuse faster in Market Expansion Scenario by 1.4 times compared to Base Case Scenario. Prerequisites for realizing Market Expansion Scenario should include: (1) batteries become lighter and the mileage of hybrid mini cars markedly increases compared to the present model of gasoline mini cars and (2) the consumers prefer single- or twin-seater vehicles because of their economic rationality.
conclusion	The analysis of the two sub-scenarios revealed that the potential market of HEVs has a large impact on HEV diffusion.

生シナリオを作成したのか？、あるいは、「作成した派生シナリオをどのように解釈することによって最終的な結論を導いたのか？」、といった論理の筋道を追跡することが可能となる。実行例における具体的な支援の内容を以下に2点示す。

第一に、本報で提案した図3の基本パターンを利用することによって、実行例において、既存シナリオの記述を再利用して派生シナリオを効率的に記述することができた。最終的に作成したシナリオの各コンポーネントで記述したExpression Levelのノードの個数を表5にまとめる。表5の結果より、既存のBase Case Scenarioの記述を再利用した部分（図3のブロック(i), (ii)に対応する）を構成するExpression Levelのノードは合計85個である。それに対して、新たに著者らが記述した派生シナリオとシナリオ全体の考察・結論部分を表すブロック(iii), (iv)の構成ノード数は合計19個である。すなわち、既存シナリオと派生シナリオを含む

Table 5 The number of Expression Level nodes by scenario component

Scenario component		Number of Expression Level nodes (%)	Remarks
(i) Common problem & hypothesis	problem	10 (10%)	Descriptions of Base Case Scenario
	hypothesis	58 (56%)	
(ii) Existing sub-scenario (Base Case Scenario)	problem	0 (0%)	reused (Total number of Expression Level nodes: 85)
	hypothesis	9 (9%)	
	simulation	0 (0%)	
	result	4 (4%)	
	discussion	0 (0%)	
	conclusion	4 (4%)	
(iii) New sub-scenario (Market Expansion Scenario)	problem	1 (1%)	Scenario texts newly described (Total number of Expression Level nodes: 19)
	hypothesis	10 (10%)	
	simulation	0 (0%)	
	result	1 (1%)	
	discussion	0 (0%)	
	conclusion	1 (1%)	
(iv) Overall discussion & conclusion	discussion	4 (4%)	
	conclusion	2 (2%)	
Total		104 (100%)	

シナリオ全体の記述のうちの82% (85/104) に対して、既存シナリオの記述を再利用することができた。

第二に、シナリオの基底を利用することにより、what-if分析のために変更すべき前提条件の候補を明確化できた。図5の結論(a)に対するwhat-if分析では、抽出した基底はExpressionとData Levelで合計15個のノードであった。一方で、Base Case Scenarioは合計88個のノード (Expression Level: 85個, Data Level: 3個) から構成されていたため、基底の利用によってwhat-if分析で変更すべき対象を17% (15/88) に絞り込むことができた。ここで得られた基底には、シミュレーションに用いられた29個の入力パラメータの値を決定付けるすべての前提条件が含まれており、したがって基底の変更によりすべての入力パラメータを変化させることが可能である。

持続可能社会に向けたシナリオを設計するという観点からは、本報で提案したwhat-if分析手法は、すでに記述されたシナリオの前提条件を見直すことによって、シナリオの記述内容に対して修正を行うことや発想を広げることの助けとなる。つまり、既存のシナリオが必然的に含んでいる将来の不確実性の幅を派生シナリオとして明示化することができる。実行例では、ハイブリッド車市場の将来動向に含まれる不確実性に対して、ハイブリッド車の普及台数がどの程度変化しうるかを示した。

しかし、本手法では派生シナリオの作成によって既存シナリオと異なる将来を描くことができる一方で、派生シナリオとして記述可能な範囲は既存シナリオの記述内容に依存する。これは、本報が対象としたwhat-if分析では既存シナリオに書かれている基底と結論を変化させることによってのみ、派生シナリオを描くことを前提としているためである。例えば、現在では低炭素社会の実現に向けて、電気自動車やプラグインハイブリッド自動車のようにハイブリッド車以外の車種の普及も進みつつある。しかし、実行例で示したハイブリッド車の普及シナリオに本手法を適用する

ことによって、それらの車種も含めた将来社会の状況を描くことはできない。このような課題を解決するためには、第3報¹⁵⁾で提案した新たなシナリオの作成方法を適用すべきである。

他方で、派生シナリオの記述範囲を広げるためのアプローチとして、本報で提案した手法を拡張し、既存シナリオの結論を非因果関係により導出している前提条件を変更することによって派生シナリオを描くことが考えられる。このようなシナリオのwhat-if分析と派生シナリオの作成方法の開発は今後の課題である。

7. 結 言

本報ではwhat-if分析に基づく派生シナリオの作成手法を提案し、この手法をハイブリッド車の将来普及に関する既存シナリオに適用した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) what-if分析に基づいて、既存のシナリオから派生シナリオを作成するための手法を提案した。この手法ではシナリオの基底を定義することにより、what-if分析において変更すべき前提条件の候補を機械的に抽出できた。
- (2) シナリオの基本パターンを利用することにより、既存シナリオの記述を再利用して効率的に派生シナリオを作成できた。

なお、本研究の成果の一部は、文部科学省科学研究費補助金 (No. 20246130, 21・316) の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) T. Tomiyama: A Manufacturing Paradigm toward the 21st Century, Integrated Computer Aided Engineering, **4**, 3, (1997) 159.
- 2) P. Schwartz: The Art of the Long View, Doubleday, New York, NY, (1991).
- 3) IPCC: Climate Change 2007 - Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II, III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, (2007).
- 4) 西岡秀三編: 日本低炭素社会のシナリオ—二酸化炭素70%削減の道筋, 日刊工業新聞社, 東京, (2008).
- 5) Y. Kishita *et al.*: Supporting Scenario Design for Describing Visions and Pathways toward Sustainable Society, Working paper for 2nd International Conference on Sustainability Transitions, C8-2, (2011).
- 6) Börjeson *et al.*: Scenario Types and Techniques : Towards a User's Guide, Futures, **38**, 7, (2006) 723.
- 7) 木下裕介ほか: 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発(第1報)—構造的なシナリオ記述に基づく論理構造の分析—, 精密工学会誌, **75**, 8, (2009) 1029.
- 8) P. Wack: Scenarios - Uncharted Waters Ahead, Harvard Business Review, **63**, (1985) 73.
- 9) 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, 東京, (2002).
- 10) K. van der Heijden: Scenarios - The Art of Strategic Conversation (2nd Edition), John Wiley & Sons, Chichester, UK, (2005).
- 11) J. Jäger *et al.*: Scenario Development and Analysis, in GEO Resource Book - A Training Manual on Integrated Environmental Assessment and Reporting, UNEP and IISD, Winnipeg, Canada, (2007).
- 12) 松岡謙ほか: 地球環境問題へのシナリオアプローチ, 土木学会論文誌, **678**, 19, (2001) 1.
- 13) Y. Umeda *et al.*: Proposal of Sustainable Society Scenario Simulator, CIRP J. Manufacturing Science and Technology, **1**, 4, (2009) 272.
- 14) 木下裕介ほか: 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発(第2報)—シナリオとシミュレータの接続による動的シナリオの作成—, 精密工学会誌, **76**, 6, (2010) 694.
- 15) 水野有智ほか: 持続可能な製造業の実現に向けた持続可能社会シナリオシミュレータの開発(第3報)—フォアキャスティング型シナリオ設計支援手法—, 精密工学会誌, **78**, 9, (2012). (in press)
- 16) E.T. Ray: Learning XML (Second Edition), O'Reilly Media, Sebastopol, CA, (2003).
- 17) M. Matsumoto *et al.*: A Modeling Framework for the Diffusion of Green Technologies, in Management of Technology Innovation and Value Creation - Selected Papers from the 16th International Conference on Management of Technology, World Scientific Publishing Company, Singapore, (2008) 121.