

## 高度なシミュレーションのための オブジェクトベース一貫モデリング過程論とその駆動支援環境

畠山正行

茨城大学工学部情報工学科

本研究の目標は、対象世界（自然現象）に実在する“もの”に対応した自然なモデリングと“もの”のモデル化をモデリング全過程に対して一貫して可能にし、“もの”単位モジュールが駆動するシミュレーションを実現することである。その目標を達成するために対象世界を最も自然かつ首尾一貫したモデリングパラダイムに従うモデリング過程を理論化した。そのモデリングパラダイムとしてはオブジェクトベースを用いた。現状の問題点は、実現モデリング段階でのパラダイムギャップである。これを解消するため、データと手続きを一体化し、“もの”オブジェクト単位でのアクセス及び起動・駆動・操作・制御しかできないような機構、即ち、オブジェクトベース機構を構想し、実現した。その結果、対象世界から再現シミュレーションまでを一貫したモデリング過程が、“もの”のモデル化の単位モジュールが駆動するシミュレーションが実現した。

- 最終目標： “もの”に一一対応した高度な発見型シミュレーションの実現
- 問題点： プログラミング段階でのデータ構造と手続きの分離モデリング
- 解決策： オブジェクトベース機構とその支援環境
- 結果： 一貫モデリング過程の実現をオブジェクトベースにより達成

### Object-Based Consistent Modeling Processes for the High Quality Simulations and Their Support Environments

Masayuki Hatakeyama

(Ibaraki University)

The aim of the present study is to realize the consistent modeling methodology to realize the high quality simulations in the fields of the natural phenomena or the engineering structures. To attain the aim, the modeling processes from the original target world up to the realization modeling stage or up to the simulation modeling stage must consistently be processed. The programming stage, one of the modeling stage, is not consistent with the model of the target world. Therefore, to encapsulate this modeling stage, the Object-Based mechanism has originally been developed. As the result, Object-based modeling paradigm throughout the whole modeling processes has been realized, and the Object-based consistent modeling processes have also been established. This mechanism has been applied to the rarefied gas flow simulation problem, and then complex and flexible simulations have been realized.

## 1 まえがき：計算機による自然現象のシミュレーション

コンピュータを用いたシミュレーションにおいては、現在まで極めて多種多様な形で無数とあって良いほど行われてきている。また、「シミュレーション」という言葉自体も、分類すれば無数とあって良いほどの定義ないし使われ方をしてきた。しかし、シミュレーションといわれるコンピュータ内での計算または処理における特徴として、細分化された各分野の対象世界毎にそのシミュレーションの手法が開発され、実施・運営されている、という現状がある。しかし、この現状は別の解釈から観ると、個々の細分化された対象分野のシミュレーションの手法はその分野でしか適用出来ない様な個別分野の豊富な知識と無数のトライ&エラー、及び実験との比較から積み上げられてきたものであって、決して何等かの方法論があった故に実現したことを意味するものではないとも言えよう。

我々自身が実現してきたシミュレーション、本論文の著者の場合は流体力学（希薄気体力学）分野内の問題の流れのシミュレーション、においても同様であった。本論文の以下ではシミュレーションという場合の対象世界としては流れの問題も含めた理学的な自然現象あるいは工学の分析・解析対象になるような現象世界とする。この様な対象世界をデジタルコンピュータを用いて再現シミュレーションすることを念頭に置く。

## 2 高度なシミュレーションの実現

### 2.1 高度なシミュレーションのための方法論

本来、解析（再現）シミュレーションでは、シミュレーション結果から新たに未知の現象が見つけれられる可能性を持つような再現駆動シミュレーションを実現すべきであると考え。従って、我々の目的はその様な本質的な意味でのシミュレーションを実現したいというところに研究の目標が存在する。そこでこのようなシミュレーションを我々はタイトルにある「高度なシ

ミュレーション」と定義することにする。本論文の目標はその様な高度なシミュレーションを実現し得る基盤的な方法を考案し・論じ・提唱し・その方法を実現し・検証することにある。と、同時に、その再現された現象に現れた現象の微細な点までも「結果として出てきた再現シミュレーション現象は結果として充分それが原世界に存在し得るものであることを信頼できると判断できる」様な方法で再現シミュレーションを実現することも目的とする。つまり、高度で有り得、かつ高度に再現された現象の信頼性が全く別な方法例えば、実験によってたとえ裏付けされなくても信頼するに足るものにしたい、ということである。

その様な目的の実現のために、現状のシミュレーション技術あるいは方法論に不足していたものは何かと言うと、我々の見解ではそれは抽象的に言えば、明示的（Explicit）な形式的方法論の欠如ということに尽きると考える。例外分野があり得る可能性は否定できないが。

その形式的方法論とは、対象世界が流れの問題も含めた理学的な自然現象あるいは工学の分析・解析対象になるような現象であることを考慮に入れると、我々の考えでは

1. “もの”に一対一対応したモデリング方法（論）
2. 原対象世界からシミュレーション駆動までの一貫したモデリング過程の方法（論）

の二つの不足（全く無かった訳では無い）であったと考える。これらの発想は極めて自然であると考え。なぜならば、対象世界が“もの”なのであるから、対象世界の“もの”と一対一に対応させたモデルを作り、それを同一（同等）内容の別表現に変換するモデリングを行って対象世界を写像する。その様な変換（写像）を必要な複数回だけモデリング過程として繰り返し、最終的には元の世界の同等内容の別表現をデジタルコンピュータ上に写像・再現してシミュレーション駆動を開始すれば良いではないか、という発想である。更には、そのモデリング方法を人間の頭脳の中で行われているモデリング方法

と相似な ( Similar ) 方法を、モデリングをやっている間じゅうずっと採用して適用し続けて行けば、モデリングの精度も高くなり、モデリングの信頼性を人間自身がその点を検証しながらモデリング過程を続けられるのであるから信頼性が飛躍的に高くなるのではないか、という発想だからである。

従来から行なわれて来たモデリングを、最初のモデリングから最後のシミュレーションまで一貫したモデリング過程というグローバルな観点から観れば、モデリングの途上におけるモデリングパラダイムの変更という出来事が、モデリングの精度を落とし、かつ精度に対する信頼性を不明なものにしている事は明かである。もう一つの主要な精度低下及び信頼性の低下の原因は人間自身が頭の中で行なってきたモデリングパラダイムと相似な ( Similar ) 方法をコンピュータシミュレーション実現において採用してこなかったことにある。

しかし、上記の形式的な方法論において挙げた二点のうち最も実現困難な点は、実装 ( プログラミング ) 段階において “もの” に一対一対応したモデリングが現状そのままのシステムでは実現されていなくまたその実現が困難であるという点にある。

## 2.2 モデリング方法論の検討

モデリング過程において最もあるべき姿として採用すべきモデリングパラダイムは人間の論理的な思考過程とその表現方式 ( プロトコル ) に最も近くに沿った方法論であるべきであり、それ故にモデリング作業過程の内部においてミスが最も少なく、従って、最も精密に対象世界をモデル化できる方法論を見つけるか探し出すことである。そしてその最も近いモデリング過程の方法としてオブジェクト指向モデリングパラダイムがあると考え [1]。採用理由は以下のようである。

1. 対象世界の “物” に対応したモデル化に適している。

2. 対象世界から再現駆動モデリングまでの一貫したモデリング過程が曲がりなりにも実現できる可能性を持つ実用上では唯一のモデリングパラダイムであること。特にプログラミング言語のサポートがあることが大きい。

3. オブジェクト指向とは人間が意識的・無意識的に行っているモデリングのうちの少なくともある一定の水準以上のレベルでかつある一定の範囲以上の汎用性を持つモデリングを表現している。言い換えれば人間の思考モデリングのかなりの部分を Explicit に表現する際の 「人間自身が行うモデリング」 の総称に近い、のではないかと思われること。

重要なのは、我々がオブジェクト指向をプログラミング技法としてではなく、モデリングの基盤パラダイムとして用いた点である。

さて、従来の自然現象や工学の対象となる現象のシミュレーションにおいてはオブジェクト指向がモデリングパラダイムに意識的に採用され、モデリング過程を一貫してこれで表現及び変換し、プログラミング言語や駆動・制御・操作に至るまでオブジェクト指向的な実現をされたという例を我々は寡聞にして知らない。その理由は実現モデリング ( 実装 ) 段階の異質なパラダイムでは一貫したモデリング方法を取ることは困難であったことに依るのではないかというのが我々の見解である。つまり、“物” から “モデル化されたもの” になり、その “モデル化されたもの” が実現モデリング段階においてモデル化された “もの” のとは異質なデータ構造とプログラムに分離されて変換されざるを得なくなった。従って、モデル化された “もの” がもつ、つまり対象世界そのものが本来に持つ特徴、例えば、極めて複雑な構造であるとか、駆動中の動的な変更であるとか、任意の観測すべき量やパターンの任意・臨機・即座の実現とかに極めて煩雑なプログラミングが必要であったり、言語の制限等で表現困難であったりした。

## 2.3 常時“もの”に対応したオブジェクトベース・モデリング

本論文ではオブジェクト指向の代わりに「オブジェクトベース」という特別な用語を用いる。この明示的なモデル・オブジェクトの概念では対象世界における“もの”と常に一対一対応させつつその後のモデリングの多段階の変換が実施される。全てのモデリング段階を通じて対象世界における“もの”との一対一対応が取れるようなモデリングが行われる。このようなモデリング過程を行うようなモデリングパラダイムを我々は特別にオブジェクトベース・モデリングと定義しその様に名付けて用いる。単位モデルの振舞いはオブジェクト間の相互作用の結果として現れる。オブジェクト間の相互作用に関しても各単位オブジェクト内に相互に記述しておく事とする。要するに全てのモデリング段階で“もの”と同等に扱え、“もの”と同等に見える様にモデル化することを「オブジェクトベース」モデリングパラダイムと称することにする。

このオブジェクトベースは根本的にはオブジェクト指向と全く同等の意味に使われている。但し、「モデリング段階の全てにおいて常にオブジェクト単位で」という点、及び、モデルの見え方、オブジェクトの起動のさせ方、オブジェクトへの操作や制御の仕方とそれに対するオブジェクトからの反応、オブジェクト間の相互作用と振舞いの様子、当の全ての面に関して“もの”と同等でかつ一対一対応が保証されていなくてはオブジェクトベースと言わないという多少厳しい定義を強いているのでこの点が通常のオブジェクト指向と異なるであろう。しかし、我々が実際にシミュレーション対象としている世界は全くの物とその振舞いの世界であり、この対象世界例のモデル表現に関してはほぼ同等のモデル表現になるであろう。オブジェクトベースモデルの構成に関しては本質的にはオブジェクト指向モデルと同等であるので省略する。

## 2.4 オブジェクトベース機構

本来、対象世界に存在するのは、物理的な実体と物質から出来上がった構造（データ構造ではなく本物の構造）だけである。機構や振舞いを生じさせる（相互）作用の情報処理的実現としての手続きなどは対象世界の認識モデルには存在しない。計算機のモデルには原理的に構造体そのものを記述するわけには行かない。従って、実装（プログラミング）過程において<データ構造>と<メソッド>で各オブジェクト内部を分けて記述するのは止むを得ないモデル化であると言えよう。しかし、このようなモデル化は明らかにモデリングパラダイムの変更であり、従って、一貫したモデリング過程を実現するためにはこの実現モデリング過程におけるモデリングパラダイム過程の非一貫性を情報隠蔽するための「何等かの新規な機構」が必要になって来る。従って、これを作り、これに沿ったようなモデリングとプログラミングを設計・実装することで、その前後のモデリングと similar なモデリングパラダイムにする必要がある。これが本研究における我々の基本方針である。また後で詳細に述べるが、この新規な機構を駆動させるためには対象世界を記述したプログラムの構成法を変えるだけではなく、この機構を用いる様に作られたプログラムをオブジェクトベース的に駆動させる機構、即ち何等かの駆動支援環境（システム）が必須になって来る。なぜならば、コンピュータシステムに関する記述は特別に止むを得ない必須のものでない限り、オブジェクト内には持たない。従って、シミュレーション用のオブジェクトの起動・駆動には各種の支援機構・機能が支援環境という形で必須である。

また、この機構ではモデリングパラダイムが真に一貫したものに変わったわけではなく、表面的な見かけだけが前後同じように見えるようになっただけであり、情報隠蔽してモデリングパラダイムが、従ってユーザのメンタルモデルでは一貫したように見えるというだけのものであり、従って、擬似オブジェクトベース機構と称すべきものである。従って、オブジェクト指向

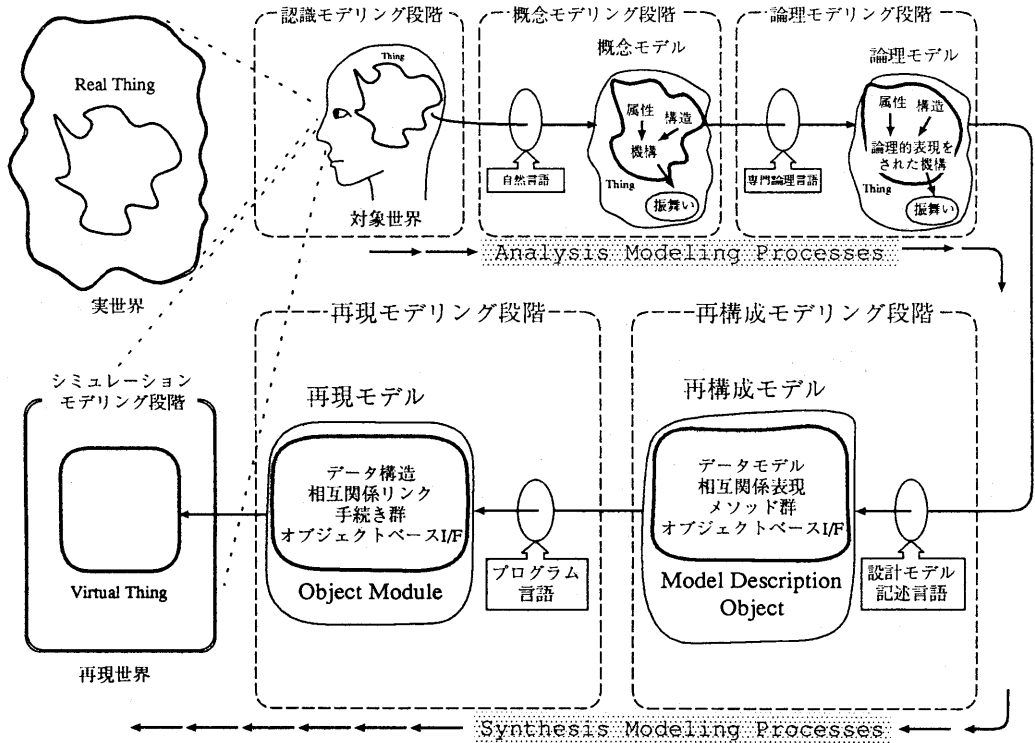


図 1: 対象世界のオブジェクトベース一貫モデリング過程

の抽象化のための「ソフトウェアの皮」としては比較的薄いものである。我々はこのオブジェクトベース機構をオブジェクト指向データベースシステム (OODB) を基盤として構築することを試みて、実現に成功している [1]。

### 3 対象世界のオブジェクトベース一貫モデリング過程

図式的表現法によって我々の提案するモデリング過程を一つの図の形で統合的に表現したものが図 1 の対象世界のオブジェクトベース一貫モデリング過程である。この図の枠組みは人間がその自然な思考過程 (モデリング過程) の下流に人間の対象世界のモデリング過程の精度のよい自然なモデリングパラダイムを設定することにより、計算機の支援を得て、対象世界を忠実にモデル化して行ったならばこのようなモデ

リング過程を通るであろうという、もっともあり得るべき合理的なモデルか過程をつないでみたモデリング過程のフレームワークである、という意味を持つ。その意味ではきわめて一般的なまた汎用的な図であると共に、きわめて常識的な図でもある。

本章以降で出て来る実現例、オブジェクトベース数値風洞及びその駆動支援環境はすべてこのオブジェクトベース一貫モデリング過程の図に沿ってかなり忠実に再現構築されている。なお、この図に関する各モデリング段階の説明は、参考文献 [1] と多少異なるが説明の主旨はほぼ同じなので紙幅の関係もあって省略させて戴く。参考文献 [1] と異なるのはモデリング方法がオブジェクトベースで行われているためにモデルの表現が具体的に内部構成が記述してある点と、表現言語名が多少具体的に記入されている点のみである。

図2には図1のオブジェクトベース一貫モデリング過程に従って行った流体现象の各モデリング段階の表現を記述してある。各モデリング段階の最下段の3行の記述欄は上から各々、モデル単位、相互作用の内容、相互関連表現を表している。詳細な説明は専門的な事項を含むこともあり紙幅の関係もあるので省略させて戴く。

## 4 オブジェクトベース・シミュレーション駆動支援環境の考察

オブジェクトベース機構はオブジェクト指向データベースシステム(OODB)の1つを用いて実現されたので、オブジェクトベース機構を駆動させる駆動支援環境は主要なプログラムはクライアント・サーバ方式で構成され、外部エンドユーザとのオブジェクトベース的なコミュニケーション機構を含む支援プログラム群として構成された。サーバ側はデータ及び永続的クラス定義(C++)を格納管理するOODBシステム、そして両者のリンクを取るとともに、クライアント側からのメッセージを解釈して、必要なオブジェクトのメソッドを起動するE-O SQLプログラム、及び両システムを結ぶソケット接続プログラムから成る。図1の単位オブジェクトの内のモデルであるオブジェクトベース・インターフェイスが再現世界の全てのオブジェクトを代表してE-O SQLとして実現されている[1]。

## 5 オブジェクトベース一貫モデリング過程とその実現例

オブジェクトベース一貫モデリング過程はオブジェクトベース機構とその駆動支援環境の支援を得て、モデリング作業及び実際のシミュレーションが実現している[1][2]。具体例としては図2にある流体现象のモデリング過程のうち、最も右側にある、確率論的分子の運動を直接シミュレーション(DSMC法)する世界、及び図の左側の連続流をシミュレーションする方程式であるナビエストークス方程式をシミュレーシ

ンする方式をオブジェクトベース機構を前提にモデリングを行い、オブジェクトベース一貫モデリングとシミュレーションの実現に成功した。

対象世界としては本論文の最初に述べたように流体力学の対象であるある流れの問題のモデル化とその数値シミュレーションを取り上げた。具体的にはオブジェクトベース希薄気体数値風洞を構築し駆動支援環境の中でそのシミュレーションを実現した。流れの構成としては、極超音速気流中を任意の姿勢を保ったスペースプレーン近傍の流れをDSMC法(メソッドとして実装)に基づく直接シミュレーションを実現した[1][2][3]。

## 6 オブジェクトベース一貫モデリング過程の有効性の検証

前章の実現から得られた成果のうち、本論文に関連するものとしては、

1. “もの”単位のモデル化と実装(プログラムシステムの作成)を行っているので“もの”単位のシミュレーション仕様の変更(例えば、試験機体の種々の変更)が特別な仕掛やシステム構築上の配慮なしに実現した。
2. 相互作用に基づく振舞いは各オブジェクト単位間で独立に実現されるので、手続き型のプログラムでは扱うのが非常に難しい複雑な流れの状況を簡単に現出させ、直ちにかつ容易に変更できた。
3. グラフィックス表現やGUIも構築し、エンドユーザインターフェイスを良くすることで、シミュレーションのリアリティを一層向上させる事が出来た。

以上の成果は、上記の三項目の複合的な効果により、更に現システムをリファインさせれば、高度なシミュレーションの名前にふさわしい実現を期待できるものであるとの結論に達した。本数値実験で得られた効果は、オブジェクトベースモデリングパラダイム、一貫モデリング過程方法論、オブジェクトベース機構、駆動支援環境等が同時に揃わなければ実現できないもので



あり、その意味で実際にそれらを同時に実現した本システム構築の意味は大きいといえよう。

## 7 結論

我々が本研究を通して得た新たな知見・結論は次の通りである。

1. オブジェクトベースモデリングパラダイムを実現させた。
2. 一貫モデリング方式の採用を実現させた。
3. シミュレーションの実現過程に対する明示的、体系的かつ形式的方法論の提唱と実現及びその実現支援環境の構築・実用化を実現した。言い換えれば、実用化された統合化支援環境とセットになったオブジェクトベース・シミュレーションアーキテクチャへの基礎を築いたとも言えよう。
4. 現象発見シミュレーションに近い方式でシミュレーションを実現できるようになった。
5. 対象世界として自然世界の物理学的あるいは力学的工学の世界に、初めて適用し成功した。

## 参考文献

- [1] 島山正行、金子 勇、「オブジェクトベース機構：オブジェクト指向一貫モデリング過程論に基づくシミュレーションの実現」、情報処理学会第17回プログラミング研究会研究報告、Vol. 94, No. 49, P P. 33-44、1994年6月3日。
- [2] 島山正行、金子 勇、「オブジェクトベース機構に基づく数値シミュレーション」、情報処理学会第51回ハイパフォーマンスコンピューティング研究会報告、Vol. 94, No. 51, p p. 1-8、1994年6月17日。
- [3] M. Hatakeyama, I. Kaneko, H. Uehara, "Numerical Wind Tunnel Simulations for

Arbitrarily Complex and/or Moving Test Bodies Based on the Object-Based Architecture and GUI", Proceedings of the 5th International Symposium on Computational Fluid Dynamics-Sendai, pp.1-279 ~1-284, Aug.31-Sep.1, 1993. (及びカラー口絵、同書 vol. 1 巻頭)