

オブジェクト指向相互作用伝達モデルに基づく 微分方程式の解法とその実行例

畠山 正行^{†1} 池田 陽祐^{†2}
三塚 恵嗣^{†2} 加藤木 和夫^{†3}

力学的な対象世界を離散的に分析モデリングし、微分方程式を差分方程式で近似して数値的に解くことは以前から多く行われてきた。また、オブジェクト指向の枠組の中で同様な計算が行われてきたが、必ずしも対象世界の仕組みを良好には反映しては来なかった。そこで本論文では差分方程式を相互作用モデルと捉え、それを物理量の輸送モデルと解釈して読み替える。そして計算機上で動かすためにメッセージ・パッシングモデルに読み替えて情報伝達の仕組みを構築し、最後にプログラムを(半)自動生成する方法を提案した。このメッセージパッシングモデルをオブジェクト指向記述法 OOJ に適用し、分析から設計と実装段階を経て Java プログラムまで一貫して整合的に変換する記述例とプログラムを実際に作成しその実行を行った。その結果、提案のモデルを用いた記述の作成とプログラムへの変換と実行の記述例を示し、分析からプログラムにまで変換する過程の一貫した整合性、実行結果の妥当性などが検証された。

A Method of Solution of Differential Equation and Its Execution Examples Based on the Object-oriented Message-Passing Model

MASAYUKI HATAKEYAMA,^{†1} YOUSUKE IKEDA,^{†2}
KEISHI MITSUKA^{†2} and KAZUO KATOUGI^{†3}

The numerical calculations have been performed using the difference equations that are approximated from the differential equations for the dynamical worlds. The similar calculations have been realized based on the Object Oriented paradigm. These results have not always been satisfactory. In the present paper, we will propose the following three models and schemes: (1)the mutual interaction model of the difference equations, (2)the transportation model, (3)the message passing model has been developed as the information transfer mechanism in the program. We have also proposed a (semi)automatic gener-

ation system of the computer program. The message passing model has been applied using the Object Oriented description method OOJ, analyzed, designed and implemented. Finally the Java program has been obtained throughout the integrally consistent and similar processes, and executed. The processes of the descriptions and their translation of the proposed model are reasonable. The integrities of the processes from the analysis up to the program and its execution examples has been verified.

1. はじめに

物理世界における現象の支配方程式として知られる微分方程式を計算機で計算するために、空間や時間を離散化しその微小空間の間の相互作用のモデル化の一つが差分方程式であることは良く知られている。計算機世界におけるもう一つの離散的なモデル化として知られているのがオブジェクト指向の考え方(パラダイム)であり、オブジェクトとして離散化された対象世界の記述単位があり、それらの間の相互作用のモデルとしては相互作用伝達^{*1}がモデル化されている。

両者の対応関係から言えば、微分方程式を計算機世界に持ち込んで数値的な求解あるいはシミュレーションを実現するには、オブジェクト指向パラダイムに基づくモデル化と再現が自然な選択肢の一つであるように思える。しかし現実にはその様ではなく、超高速計算が第1と考えるユーザの意志で微分方程式の数学的な形式化(数値解法の開発)と手続き型の言語である Fortran 系の言語を用いた大規模計算とそのため数値計算の実行が盛んである。勿論、自然現象を離散的にモデリングをし、離散記述単位とするオブジェクトを抽出し、

†1 茨城大学工学部情報工学科

Department of Computer and Information Sciences, Ibaraki University

†2 茨城大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University

†3 茨城県立産業技術短期大学

Ibaraki Prefectural Industrial Technology Junior College

*1 計算機世界は情報の世界であるので、力学的な現象である相互作用は離散単位記述の間の相互作用の“情報を伝達”するモデルとして表現される。つまり、オブジェクト指向における相互作用を記述する形式であり、例えば、力のベクトル $\mathbf{V}(x,y,z,t)$ は情報に変換されて相互作用の相手に伝達される、とする。この相互作用情報伝達を表すオブジェクト指向分野の用語として message passing があり、略して mp とも呼ばれる。本論文では提案するモデルがこの相互作用伝達モデルである message passing の利用方法のモデルでもある故に、論文では敢えてメッセージ・パッシングモデルという言葉を用いる。この用語を用いるもう一つの理由は、力学分野の相互作用モデルという用語が相互作用伝達モデルという用語が紛らわしく誤解を生みやすいという意見があったので敢えて採用する。了解されたい。

相互関係を付けてモデル化することは以前から良く知られて居り、その仕組みに基づいた自然現象のシミュレーション^{1),2)} や工学的な解析の数値計算も行われてきている³⁾⁻⁵⁾。

そこで、本論文では微分方程式の解法としてオブジェクト指向パラダイムの特徴をよりよく生かすと思える微分方程式の離散化計算法を提案する。この技法をより有用な仕組みとするために、既存の方法から新たに提案した方法までをカバーする一つのモデルを提案する。そして、そのモデルを一つの対象世界に適用/応用し、分析記述からプログラムまでの変換過程を観察し、モデル記述の追跡性、プログラム実行結果の妥当性と有効性などを検証する。それにより、より自然にあるいはより簡易に微分方程式の解法あるいは自然現象のシミュレーションを行う方法を提供して、力学現象の解析等を自身の専門にする人達の役に立つモデルと手法を提案する。

本論文で離散化された微分方程式にオブジェクト指向パラダイムを採用する理由は、

- (1) 離散的な力学のモデルとオブジェクト指向のモデルの読み替えによって、数値計算を行う人達に十分有用なプログラムが作れることを指摘すること。
- (2) 数値計算/数値シミュレーションの世界がオブジェクト指向の世界にスムーズに繋がることによってプログラムを組む負担を減少させることが出来る点について理解を得る。つまりプログラムの(半)自動生成を実現できる事例が増えることを理解して貰う。
- (3) 対象世界の分析から実行まで一貫してオブジェクト指向パラダイムに沿って作業すれば、整合性の高い数値計算が実現可能であることを事例として実証する。

という三つの有用性を検証する狙いがある。

2. 従来型の離散化された微分方程式の解法

2.1 離散化モデルと差分方程式の導出

取り上げる微分方程式としてはその対象世界として著者の専門分野(ドメイン, domain)の一つである力学(流体力学)の世界から「一次元衝撃波管流れ」*1を例にとり、流体力学現象のモデル化を対象とする。そこで、本論文がモデルと解法の提案がテーマであるので、

*1 衝撃波管は直径が通常は、十センチ程度の円形断面をしており、長さは通常は数メートルある。本来の衝撃波管は左に高圧部があり、 $x=0.2$ くらいに張ったマイラーと呼ぶ高強度の膜を破って 10 気圧程度の高圧気体(空気)を吹き出させると、約 1 メートル程度の助走長を経て垂直衝撃波が立ち上がる。衝撃波管の内側に発生する境界層を無視すれば、理想的な一次元衝撃波流れを作ることが出来る。衝撃波管の内側を走った衝撃波は、 $x=1.0$ まできたらダンブタンクと呼ばれる大きな貯気層に入って減速し、衝撃波は消失する。

非線形ではあるが時間と空間に対して一次元であるような簡単な微分方程式とした。以下に示す。

$$U_t + E_x = 0 \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ m \\ e \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} m \\ m^2/\rho + p \\ m(e+p)/\rho \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$u_t + f_x = 0, f = \frac{u^2}{2} \quad (3)$$

(1), (2) 式は圧縮非粘性流れを表すオイラー方程式である⁶⁾。これからスカラーモデル方程式を導出したのが非粘性バーガース方程式(3)であり、これを扱う対象の微分方程式とする。この非粘性バーガース近似方程式を離散モデル化し、保存系の差分方程式を作る方法は幾多の方法があるが、本論文では二次精度の陽的な差分法である Lax-Wendroff の方法を採用した⁶⁾。この Lax-Wendroff の方法の実際に用いた式は(4)と(5)である。ただし複雑な計算式の表現を避けるために本来の式よりも更に簡約化されている。この式において変数 $u(i)$ が現時点の速度 u の値で $u3$ は予測子の値、 un は修正子の値で次の時点の u の値を持つ。CN とは Courant 数で、 $CN = \Delta t / \Delta x$ である。

$$u3(i-1) = \frac{1}{2} \{ (1 - CN)u(i) + (1 + CN)u(i-1) \} \quad (4)$$

$$un(i) = u(i) - CN \{ u3(i) - u3(i-1) \} \quad (5)$$

2.2 一次元衝撃波流れの離散モデルと従来型のオブジェクト指向計算法

力学的な離散化モデルの分析結果と従来から行われてきたオブジェクト指向に基づく計算法のオブジェクト、属性、振舞い、相互関係の対応関係を図 1 に示す。図 1 で示しているように衝撃波管内のセルをオブジェクトとし、セルの衝撃波速度を求めるための Lax-Wendroff 法の差分方程式⁶⁾を振舞いとする。そして差分方程式の計算のために式の右辺にある項の値を他セルに要請して送って貰い、その結果として自身の次に時点の値 $un(i+1)$ を求めるという方式である。

この方法は従来から行われてきた差分方程式の解法と空間を離散化した単位としてのセ

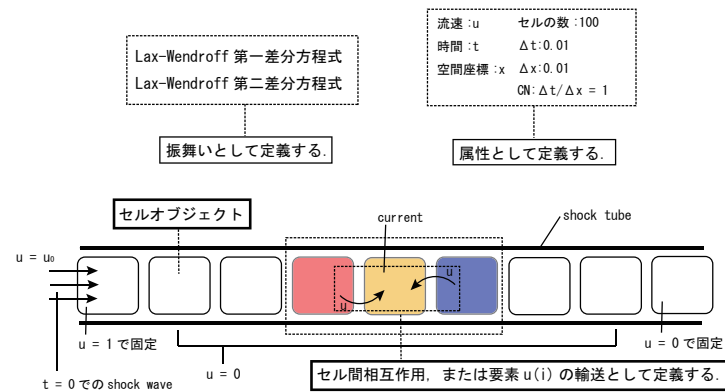


図 1 離散化モデルとオブジェクト指向要素の対応
Fig. 1 Correspondence of Discrete Model with Object Oriented Elements

ルとを形式的に当てはめて設定したオブジェクト指向に則った計算方式であり、我々の従来の方法や他の関連する研究等もこの方法または類似の方式を採用して計算してきた。従来型の手続き型計算と異なる点は他セルのデータを手に入れる方法である。

3. 離散化された微分方程式の輸送モデルへの変換

3.1 物理世界の離散化モデルの原理と相互関係

本論文で用いる離散化の原理図を図 2 に示す。離散(化)モデリングした単位は楕円で描いてある。離散化単位とは通常はモノは概念が代表例であるが、離散的にモデリングされ、単位として記述可能な要素は全て離散化単位である。例えば、離散化された単位(例えば自動車)が内部に持つ部品(エンジンとか、タイヤとか)も離散単位である。

複数の離散化単位を繋いで付与されるのが相互関係である。相互関係には図に示すように通常の離散化と同様に二種類あり、固定的な関わりは相互関連、臨時的な(短い時間だけの)関わりであるメッセージ・パッシングと呼ぶ。

3.2 従来の離散解法に対する異なったモデル形成のアプローチ

力学的な現象の離散単位間の相互作用は数値的に一意的に決めるためにはその相互関係を数式で定義する必要がある。つまり、Lax-Wendroff の方法の様な数式表現されたセルの

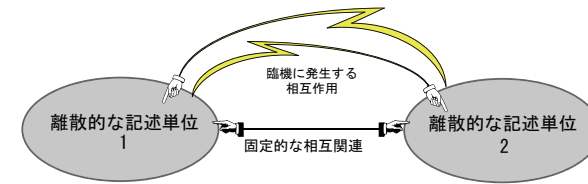


図 2 物理世界の離散化モデルの原理
Fig. 2 Principle of Discrete Model and Physical World

物理量属性に関する量的・数値的な相互関係式が必要である。すなわち差分式は相互作用のモデルであると言える。相互作用のモデルが相手の離散単位に対して何らかの物理量に対応する属性値を与えるという点から見れば、差分方程式は一種の物理量輸送モデルと見なすことが容易に可能である。

そこで例えば、この Lax-Wendroff の差分式を物理量輸送モデルとして見、この Lax-Wendroff の差分式を変形して力学的に自然な輸送モデルとして解釈が出来る様なモデルに作り替える。これは差分方程式で表された相互関係式を力学的な相互作用に見なす様に変換あるいは式変形することに相当する。これは力学分野の人の考え方や見方に合わせた変換でもある。

3.3 Lax-Wendroff の差分方程式の輸送モデルへの見直し

離散要素間の相互関係としてオブジェクト間の質量、運動量、エネルギー、熱流等を表す微分方程式を差分化した差分(算術)方程式を考える。ただし実際には第 2.2 節で導いた非粘性バーガス方程式を差分化した Lax-Wendroff の差分方程式を輸送モデルに変換して行く。まず current 離散単位の変数 $un(i)$ を左辺に、それ以外の現時点の変数 $u(i+1)$ や $u(i-1)$ を右辺に移項する変形を行う。ただし、Lax-Wendroff の差分方程式は単純な式なので、先述の式そのままでもよい。

$$u3(i-1) = \frac{1}{2} \{ (1 - CN)u(i) + (1 + CN)u(i-1) \} \quad (6)$$

$$un(i) = u(i) - CN \{ u3(i) - u3(i-1) \} \quad (7)$$

そしてこの式を以下のように解釈する。

- (1) この (7) 式の左辺の $un(i)$ は右辺の変数 $u(i-1)$ を直接隣接したセルから送って貰って、それらを自身の次の時間ステップの計算に用いる、という式であると見なすことが出

来る。

(2) そこでこの(7)式を逆の立場で見ると、この式は右辺の変数 $u(i+1)$ や $u(i-1)$ を持つ $(i+1)$ 番セルと $(i-1)$ 番セルに予め変数 $u(i)$ を送っておけば良いことになる。したがって、各セルでこの変数 $u(i)$ をその隣接セルに送るといふ振舞いを記述すればよい。

以上の変形と解釈により変量の輸送という形に変形したので、力学的観点から見れば輸送モデルを作ったことになる。非粘性バーガース方程式の場合は速度 $u(i)$ についての方程式に近似的に変形されているので、速度 $u(i)$ が輸送されていると読める。

4. 提案するメッセージパッシングモデルから数値計算プログラムへの変換まで

4.1 数理的な離散化モデルのオブジェクト指向の世界における扱い

さて、離散的な数理力学モデルの取扱いでは、離散単位群とその間に働く相互作用によって対象世界全体の動きが決まる、というのが力学世界の原理である。離散化のモデリングの原理図は既に第3章の図2で示した。一方、オブジェクト指向の世界における離散単位であるオブジェクトも全く同じ図に対してその名前等を読み替え、同じ様な枠組でその原理を説明できる。オブジェクト指向の原理図を図3に示す。

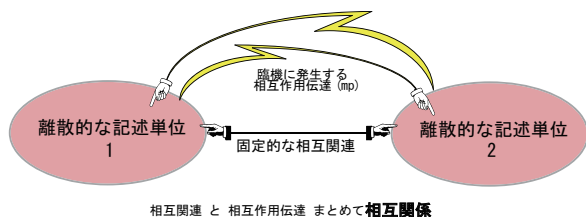


図3 オブジェクト指向の世界における離散モデリングとその構造化

Fig.3 Discrete Modeling and Its Structuration Principle in Object Oriented World

離散単位であるオブジェクトは同様に楕円で表現されている。オブジェクトの内部は属性と振舞い記述、そして相互関係が記述されている。相互関係は図2の様な通常の世界と同様に2種類あり、複数要素間の静的な(時間により変化しない固定的な)関わりを相互関連、複数要素間の動的な/臨時的な(短い時間だけの、あるいは時間変化のある)関わりを相互作用(オブジェクト指向の世界ではメッセージ・パッシング)と呼ぶ。

そして、この原理的な作業を対象世界の必要な離散(化)要素の全てに対して例外なく行い、それによって対象世界全体を捉えて記述/表現するのが本論文で用いる**オブジェクト指向の方法**である。多数のオブジェクトが関わる複雑な対象世界もこの方法で離散的にモデリングし、相互関係を付与することで常に表現可能である。したがって、離散的な数学の世界や離散力学的な世界もオブジェクト指向の世界の表現あるいは記述に常に読み替え可能である。両世界の異なる主な点は以下の二点である。

1. 離散単位の呼び名が読み替えられる。しかし実質的には同じモノを指す。
2. 相互作用の扱い方が変わる。力学表現ではなく力学的内容の情報表現とその伝達表現に変わる。

4.2 離散的な力学とオブジェクト指向の対応関係

表1 離散的な力学世界とオブジェクト指向の世界の要素種類

Table 1 Element Kinds of Discreted Dynamical World and Object Oriented World

離散的な力学と数学の世界	オブジェクト指向の世界
モノ, 概念, 物質, 物	● 1 オブジェクト 1.1 モノ/概念 (他は省略)
変数, 変量, 定数	● 2 属性 ・ 2.1 振舞い参照属性 / ・ 2.2 mp 付置属性 (他は省略)
振舞い	● 3 振舞い
内部振舞い	・ 3.1 内部振舞い
相互作用	・ 3.2 message passing(相互作用伝達) (他は省略)
相互関係	● 4 相互関係 ・ 4.1 相互作用伝達 (mp) / ・ 4.2 集約 ・ 4.3 汎化/特化 / ・ 4.4 実値化 (他は省略)

表1に離散化された力学の構成とオブジェクト指向パラダイムの構成とその対応関係を示した。この表で重要な点はオブジェクト指向の要素種類は対象世界の記述を大きく分けるとこの四種類で実現するモデルを採用している点である。

4.3 輸送モデルのメッセージ・パッシングモデルへの変換

以上の準備の下に、速度 $un(i)$ の輸送モデル(7)式を考えると、力学世界の速度 $un(i)$ の輸送モデル(7)式は、 $u(i)$ という情報を隣のセルオブジェクトへ伝達する、という表現に変

換すれば良いことが容易に分かる。つまり、微分方程式の離散化近似式である差分方程式は相互関係式であると見ることが出来、微分方程式の性質からしてその相互関係式は輸送モデルとして見なすことができる。

更にその輸送モデルを情報世界の表現の1つとしてオブジェクト指向パラダイムの枠組内部記述に変換すれば、オブジェクト指向の情報世界の伝達形式であるメッセージ・パッシングのモデルと見ることが出来る。これが本論文で提案する**オブジェクト指向相互作用伝達(メッセージ・パッシング)モデル**である。メッセージ・パッシングはオブジェクト指向特有の用語である message passing (mp とも略す)とも呼ぶので、**mp モデル**という呼び名も可能である。

この様にして「メッセージ・パッシングモデル」においては輸送される相手の (i-1) 番と (i+1) 番セルに対して、オブジェクト指向特有の概念であるメッセージ・パッシングの付置属性(メッセージ本体に付置して送られる属性、この場合は $u(i-1)$) が相手セルへと輸送されることになる。そして、その表現法としては、例えば、

速度 $u(i)$ を隣接セルへ輸送する ≧相互作用輸送≧ {(i-1) 番と (i+1) 番セル}

これを情報伝達世界に読み替えてメッセージ・パッシング (mp) で表現すると、

メッセージを送る ≧ mp ≧ {(i-1) 番セルと (i+1) 番セル宛}
| 付置して送る属性 : $u(i)$

の様になれば理解し易いことが分かる。記号“≧”は相互作用あるいはメッセージの送られる向きを表している事は了解できよう。これで図2または図3の矢印で表された相互作用の表現法が分かった。送られる物理量 $u(i)$ はメッセージに付置されて送られるので、二行目に付置される形式で書かれている。それ以外は日本語なので理解し易い。

4.4 オブジェクト指向記述からプログラムへの変換の方法

図4にオブジェクト指向記述をプログラムへ変換する仕組みの概略を模式図で示す。図4

の左半分は前節までに述べたことを表す図である。離散力学的なフォーミュレーションとオブジェクト指向モデリングの各段階では対応する段階毎に「相互に読み替え可能」であることを示している。また、従来計算として示した細い枠線は従来型の数値計算プログラム作成への過程を示している。

中央にある輸送モデルはメッセージ・パッシングモデルへと読み替えられて最初のオブジェクト指向分析記述が書かれる。その記述はオブジェクト指向記述も混じるものの、図の左半分に位置する離散的な力学の世界そのままの表現になっている。記述内容実体が力学現象の分析記述であることは初心者でも約5分の説明があれば十分に読めて・理解できて・記述可能である。具体的な記述例を次章に記述やプログラムの図を掲載する。

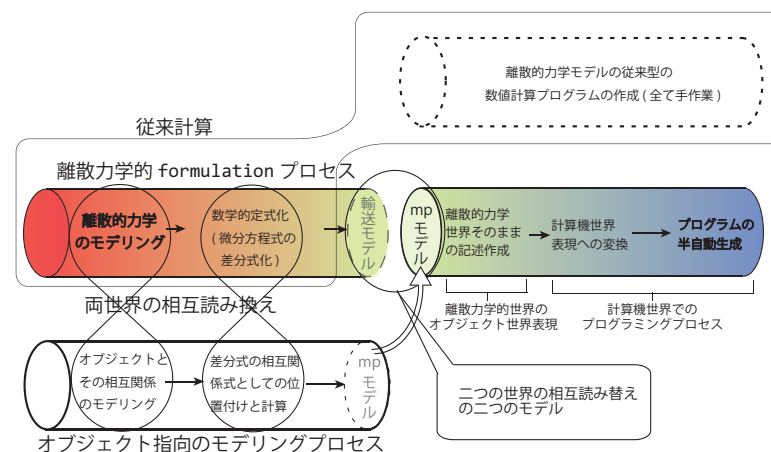


図4 離散的な差分モデルと計算機的なメッセージ・パッシングモデルの読み替えの全体図
Fig.4 Replacement of Differential Model with Message Passing Model

この分析記述が完成すれば、担当者でなければ記述できない点を除けばトランスレータにより「計算機世界表現への変換」が行われ、変換された設計記述法は計算機世界でのプログラミングプロセスを経て、プログラム(オブジェクト指向プログラム)に変換させる。

5. 離散モデルのためのオブジェクト指向記述法 OOJ を用いた記述例

5.1 オブジェクト指向記述方法 OOJ

前節までに提案したメッセージ・パッシングモデル表現の力学モデルを分析から一貫して変換し、プログラムにまで変換するには適切な記述方法が表現言語が必要である。そのために開発されたのがオブジェクト指向記述法 OOJ である*1。言語の詳細については他の論文^{8),9)}等に述べられているので、本論文では OOJ を利用して記述するための最小限の説明を記述例に並行させつつ行う。

5.2 一次元衝撃波流れの分析段階の記述

図 5 は第 2 章で述べた一次元衝撃波流れの従来の方法による分析段階の記述を示す。current セルの必要に応じて両隣のセルに必要な速度 $u(i-1)$ や $u(i+1)$ の速度を送るように要請し、送られてきた速度データを用いて計算を行っている。

1	fn1.1	currentセル	
-4	fn3.3	衝撃波の予測子速度を求める。	
-1	fn3.2	上流セルの衝撃波速度の要請をする。	》mp 》 上流セルの衝撃波速度の要請をする。...
-2	fn3.2	上流セルの衝撃波速度を取得する。	《mp 《 衝撃波の予測子速度を求める。...
-3	fn2.2	(属性) 上流セル衝撃波速度	
-4	fn3.1	衝撃波予測子速度=0.5*((1-CN)*上流セル衝撃波速度)+(1.0+CN)*衝撃波速度)	
-5	fn2.1	(属性) (衝撃波速度, 衝撃波予測子速度, 上流セル衝撃波速度)	
-5	fn3.3	衝撃波の修正子速度を求める。	
-1	fn3.2	下流セルの衝撃波速度の要請をする。	》mp 》 下流セルの衝撃波速度の要請をする。...
-2	fn3.2	下流セルの衝撃波速度を取得する。	《mp 《 衝撃波の修正子速度を求める。...
-3	fn2.2	(属性) 下流セル衝撃波速度	
-4	fn3.1	衝撃波修正子速度=衝撃波速度-CN*(衝撃波予測子速度-下流セル衝撃波速度)	
-5	fn2.1	(属性) (衝撃波修正子速度, 衝撃波速度, 衝撃波予測子速度, 下流セル衝撃波速度)	

図 5 分析段階の記述法で表現した従来型の離散化モデルの記述

Fig. 5 Conventional Discrete Model using Analysis Stage Description Method

*1 OOJ^{8),9)}, ひいては OONJ¹⁰⁾, ODDJ¹¹⁾, OPDJ¹²⁾ を記述言語と呼んできた。しかし“言語”とは文法と語彙のセットを備えるものであるという厳密な定義であるならば、これ等は言語には当て嵌まらない。その骨格を成すのは構造記述のための枠組 (OOSF)⁷⁾ だけであり、一つの文の内部の構造を示すのが文法という意味での文法ならばそれは全て日本語文法が担っている。記述の方法の離散的な対象に対して纏まった記述の仕組みを持つ故に記述言語と呼んできたのである。それ故に記述法、あるいは記述モデルと位置付けることも可能である。

これと比較して図 6 ではメッセージ・パッシングモデルを用いている。つまり自身の速度 $u(i)$ の値をまず計算し、その新たに計算された値を両隣のセルに対してデータを送れとの要請が来るより先に自発的に輸送している。

1	fn1.1	currentセル	
-4	fn3.3	衝撃波の予測子速度を求める。	
-1	fn3.1	衝撃波予測子速度=0.5*((1-CN)*上流セル衝撃波速度)+(1.0+CN)*衝撃波速度)	
-2	fn2.1	(属性) (衝撃波速度, 衝撃波予測子速度, 上流セル衝撃波速度)	
-5	fn3.3	衝撃波の修正子速度を求める。	
-1	fn3.1	衝撃波修正子速度=衝撃波速度-CN*(衝撃波予測子速度-下流セル衝撃波速度)	
-2	fn2.1	(属性) (衝撃波修正子速度, 衝撃波速度, 衝撃波予測子速度, 下流セル衝撃波速度)	
-6	fn3.3	衝撃波を伝搬する。	
-1	fn3.2	上流セルに衝撃波速度を輸送する。	》mp 》 上流セルに衝撃波速度を輸送する。...
-2	fn2.2	(属性) 衝撃波速度	
-3	fn3.2	下流セルに衝撃波速度を輸送する。	》mp 》 下流セルに衝撃波速度を輸送する。...
-4	fn2.2	(属性) 衝撃波速度	

図 6 分析段階の記述法で表現したメッセージ・パッシングモデルの記述

Fig. 6 Message Passing Model using Analysis Stage Description Method

5.3 一次元衝撃波流れの設計段階及び実装段階の記述

図 7 は設計段階の記述の変換した current セルのメッセージ・パッシングモデルの記述である。Lax-Wendroff の差分方程式は当初の分析段階から本 OOJ に適合する形式で記述されていたので、変更はない。変更があったのは属性のデータ型、及びアクセス属性の記述の追加のみである。詳説は避けるが、よく使われる数式であれば、OOJ の仕様に合わせているので、トランスレータによる変換は無しで設計段階記述になっている。

5.4 一次元衝撃波流れの Java プログラム

図 8 は実装段階の記述をトランスレータによって自動変換して得られた Java プログラムである。このプログラムは実行可能という点では完全なプログラムであり、コンパイラも実行の問題なく処理出来た。したがって、各段階の記述及びトランスレータは期待通り機能したことが分かった。

1	fn1.1	currentセル		
-4	fn3.3	衝撃波の予測子速度を求める。	void	world_shared
-1	fn3.1	(二分枝) t=0		
-2	fn3.1	ならば		
-3	fn3.1	上流セル衝撃波速度=u[セル番号+1]		
-4	fn3.1	違えば		
-5	fn3.1	衝撃波予測子速度=0.5*((1-CN)*上流セル衝撃波速度)+(1.0+CN)*衝撃波速度)		
-5	fn3.3	衝撃波の修正子速度を求める。	void	world_shared
-1	fn3.1	衝撃波修正子速度=衝撃波速度-CN*(衝撃波予測子速度-下流セル衝撃波速度)		
-2	fn3.2	衝撃波を伝搬する。	》駆動mp》	衝撃波を伝搬する。
-6	fn3.3	衝撃波を伝搬する。	void	world_shared
-1	fn3.2	上流セルに衝撃波速度を輸送する。	》mp》	上流セルに衝撃波速度を輸送する。
-2	fn2.2	衝撃波速度	int	slot_shared
-3	fn3.2	下流セルに衝撃波速度を輸送する。	》mp》	下流セルに衝撃波速度を輸送する。
-4	fn2.2	衝撃波速度	int	slot_shared

図 7 設計段階の記述法で表現したメッセージ・パッシングモデルの記述
Fig. 7 Message Passing Model using Design Stage Description Method

```
//OPDJ記述でのフレーム名:currentセル
class NDPw01_Pf015 {

private double NDPw01_Pf015_Ps03_Pss07; //OPDJ上での属性名:衝撃波速度
private double NDPw01_Pf015_Ps03_Pss013; //OPDJ上での属性名:衝撃波予測子速度
private double NDPw01_Pf015_Ps03_Pss019; //OPDJ上での属性名:衝撃波修正子速度
private double NDPw01_Pf015_Ps03_Pss025; //OPDJ上での属性名:上流セル衝撃波速度(輸送された衝撃波速度)
private double NDPw01_Pf015_Ps03_Pss031; //OPDJ上での属性名:下流セル衝撃波速度(輸送された衝撃波速度)

//OPDJ記述でのスロット名:衝撃波の予測子速度を求める。
public void NDPw01_Pf015_Ps050{

if( Main.world.variable.NDPw01_Pf018_Ps02_Pss019==0 ){ //OPDJ記述上では二分枝構造:id:NDPw01_Pf015_Ps05_Pss07
//OPDJ記述上では真条件「ならば」:id:NDPw01_Pf015_Ps05_Pss013
上流セルNDPw01_Pf015_Ps03_Pss07=u[セル番号+1]; //OPDJ記述上では数式サブスロット:id:NDPw01_Pf015_Ps05_Pss019
}
else{ //OPDJ記述上では偽条件構造:id:NDPw01_Pf015_Ps05_Pss025
NDPw01_Pf015_Ps03_Pss013=0.5*((1-Main.world.variable.NDPw01_Pf018_Ps02_Pss025)*NDPw01_Pf015_Ps03_Pss025)+(1.0
+Main.world.variable.NDPw01_Pf018_Ps02_Pss025)*NDPw01_Pf015_Ps03_Pss07); //OPDJ記述上では数式サブスロット:
id:NDPw01_Pf015_Ps05_Pss031
}
//OPDJ記述でのスロット名:衝撃波の修正子速度を求める。
public void NDPw01_Pf015_Ps060{

NDPw01_Pf015_Ps03_Pss019=NDPw01_Pf015_Ps03_Pss07-Main.world.variable.NDPw01_Pf018_Ps02_Pss025*(NDPw01_Pf015_Ps03_Pss013-
NDPw01_Pf015_Ps03_Pss013); //OPDJ記述上では数式サブスロット:id:NDPw01_Pf015_Ps06_Pss07
NDPw01_Pf015_Ps03_Pss019; //OPDJ記述上ではスロットmpサブスロット:id:NDPw01_Pf015_Ps06_Pss011
}
//OPDJ記述でのスロット名:衝撃波を伝搬する。
public void NDPw01_Pf015_Ps070{

NDPw01_Pf015_Ps03_Pss07(NDPw01_Pf015_Ps03_Pss019); //OPDJ記述上では数式サブスロット:id:NDPw01_Pf015_Ps07_Pss07
NDPw01_Pf015_Ps03_Pss07(NDPw01_Pf015_Ps03_Pss019); //OPDJ記述上では数式サブスロット:id:NDPw01_Pf015_Ps07_Pss021
}
}
```

図 8 Java プログラムで表現したメッセージ・パッシングモデルの記述
Fig. 8 Java program for One-dimensional Shock Wave Flow based on Message Passing Model

6. 比較評価と考察

6.1 一次元衝撃波流れのメッセージ・パッシングモデルについて

図 7 は図 5 に比べて記述がある程度変化しているのが見て取れる。両者を比較すると、図 6 の方がメッセージパッシングの数が半減しており、相互作用をするときだけにメッセージを発信している。これは数式の必要性に応じてデータを要求し、貰ったら計算をする、という言わば数学的な計算のためのメッセージに依るデータ通信というイメージではなく、相互作用をする current セルが変化したら (計算を終わったら)、状態が変化したのであるから相互作用として隣接セルに伝えるという計算をしているイメージであり、セルの動きを現象により近いイメージで捉えているということが出来る。

6.2 一次元衝撃波流れの各段階の記述及び Java プログラムの変換の整合性

図 6 の分析段階記述が完成すれば、対象世界から抽出されるべき必要情報は全て含まれている状況になる。それを図 7 の設計段階記述に (トランスレータで自動的に) 変換し、更にターゲットとするオブジェクト指向プログラミング言語 (現在は Java のみ) を考慮してトランスレータで自動変換すれば、図 8 の Java プログラムが得られる。三つの記述に関しては各記述法の構造記述規則⁹⁾ について相互に整合的に変換される構造記述規則になっていることが既に立証されており、分析記述と少なくとも設計記述及び実装記述の内容が同等内容の別表現であることは保証されている。

また、本論文で用いた一次元衝撃波流れの場合はそれらが全て数式で、しかも OOJ に準拠した数式、になっているために完全に自動変換されている。したがって、

- (1) 図 6 の分析記述が十分であれば、力学的な記述のイメージを残しつつ、図 4 の様なプロセスを経て自動変換された完全な (実行可能な、という点で) プログラムが自動生成されていることは明白である。
- (2) ただしこの記述例の場合、設計段階記述法の段階でデータ型とアクセス属性を、実装段階記述法の標準出力の記述を追加している。そういう意味でこの記述例の場合も半自動生成であるという結果になった。

6.3 微分方程式の解法としてのメッセージ・パッシングモデルの応用

本論文は特定の微分方程式を離散化 (差分式化) し、それを例にして行われたので、必ず

しも広い応用分野に適用できる事を立証したわけでない。しかし、流体力学への適用が、離散化された微分方程式の「解釈の一つ」に過ぎない点に了解を頂けるとすれば、

- (1) 提案した解法の流れ手順を follow して行けば、離散化微分方程式を数値的に解く場合にある程度広い分野に便利に適用または応用できる可能性を見出せる点。
- (2) 輸送モデルとメッセージ・パッシングモデル、そしてそれらのモデルの相互読み替え、という考え方は必ずしも目新しいモデルではない。しかし、そのような考え方に少し変えることで、力学モデルや微分方程式の離散化モデルの扱い方からプログラムに至る道筋が容易に見出せる点。

などは本論文からの類推も容易になるという点では有用な考え方ではなかろうか。

6.4 関連他研究との比較評価

Modelica¹³⁾ は保存系に対する物理モデリングを非因果モデリングとして定式化し、Modelica 言語で記述する。相互作用に当たる要素は結合 (connector) とインタフェースが最も近い概念であるが、その記述法について直接/間接に比較すべき概念や方法までは見出せなかった。(Modelica は OOJ とならば比較評価すべきであろう。) オブジェクト指向計算力学³⁾ や Jerry¹⁾ の著書等も概論であり、本論文の様な相互作用とその変換/読み替えに関する詳細には触れていない。結論として直接の比較評価は出来なかった。

7. 結論と今後の課題

力学的な対象世界を分析し、その相互作用モデルとしての微分方程式を離散化した差分方程式を輸送モデルとして解釈し、メッセージパッシングモデルとして読み替えてオブジェクト指向の世界で記述することで微分方程式のプログラム化までの道筋を容易に辿れて記述できるモデルを提案した。

そのメッセージパッシングモデルをオブジェクト指向記述法 OOJ に従って記述し、それを設計と実装段階を経て Java プログラムまで変換し、一貫した整合性を持った記述と変換が行われたこと、計算結果が妥当であることが分かった。

今後の課題としては、メッセージ・パッシングモデルをより広く応用し、より多様な微分方程式や差分方程式に適用して応用範囲を広く確実にすることと、プログラムへと (半) 自動変換できる事例を増やして、自動変換可能な分野やケースをより広げることを目指したい。

参 考 文 献

- 1) Jerry Banks (ed.), Handbook of Simulation, Principle, Methodology, Advances, Applications, and Practice, John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- 2) M. Hatakeyama, M. Watanabe, T. Suzuki, "Object-oriented Fluid Flow Simulation System", Computers and Fluids, Vol.27, Nos.5-6, pp.581-597,1998.
- 3) 矢川元基, 関東康祐, オブジェクト指向計算力学入門 C++による数値解析プログラミング, 培風館, (1999年6月).
- 4) 吉岡理文, 石谷久, 松岡隆治, オブジェクト指向的手法による大規模発電所排熱の有効利用評価, 日本シミュレーション学会誌, **13-2**, 67/74 (1994)
- 5) 金子勇, 畠山正行, オブジェクト指向シミュレーションの実現とその実行環境, 日本シミュレーション学会誌, **17-4**, 295/309 (1998).
- 6) 数値流体力学編集委員会編, 数値流体力学シリーズ 2, 圧縮性流体解析, 東京大学出版会, 1995年.
- 7) 畠山正行, オブジェクト指向自然日本語構造化フレーム OOSF の設計と表現技法, シミュレーション学会誌, **22-4**, 195/209, Dec., (2004).
- 8) 大木幹夫, 片野克紀, 三塚恵嗣, 沼崎隼一, 涌井智寛, 加藤木和夫, 池田陽祐, 畠山正行, 三言語独立のオブジェクト指向記述言語 OOJ の実装と検証, 第 163 回 SE 研究会報告, 2009-SE-163, pp.49-56, (2009).
- 9) 池田陽祐, 大木幹夫, 三塚恵嗣, 畠山正行, 単言語方式のオブジェクト指向プロセス記述言語 OOJ の設計, 第 163 回 SE 研究会報告, 2009-SE-163, pp.57-64, (2009).
- 10) 池田陽祐, 畠山正行, 三塚恵嗣, 加藤木和夫, 大木幹生, オブジェクト指向分析記述言語 OONJ の記述例を用いた簡潔な表現技法の開発, 情報処理学会 MPS 研究会研究報告, MPS-78-18, 2010年6月17日.
- 11) 川澄成章, 畠山正行, 野口和義, オブジェクト指向設計記述言語 ODDJ の設計とその記述環境の開発, 第 150 回 SE 研究会報告, 2005-SE-150, pp.65-74, (Nov. 29, 2005).
- 12) 加藤木和夫, 畠山正行, オブジェクト指向プログラム自動生成記述言語 OPDJ とその記述開発環境, 第 61 回 MPS 研究会報告, 2006-MPS-61, pp.65-68, (2006).
- 13) Michael M. Tiller, Modelica による物理モデリング入門, オーム社, 平成 15(2003年)年 11月.
- 14) <http://gaea.cis.ibaraki.ac.jp/>