

メッセージパッシングモデルに基づく差分方程式 の計算方式とその実行例

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モデリングと計算が行われてきたが、必ずしも対象世界の仕組みまでを忠実に反映していたとは限らなかった。そこで本論文では差分方程式を相互作用式と捉え、詳細に分析して相互作用相手への作用量を計算し、その作用情報を送るためにメッセージ形式に組み立てて相互作用情報として送る様な記述を行う仕組みを提案した。これを仮に mp モデルと呼ぶ。この mp モデルをオブジェクト指向記述言語 OOJ を利用して、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、分析からプログラムに至る変換過程の一貫した整合性、実行結果の妥当性などが 1 つの事例として検証された。以上から、この mp モデルが科学技術計算や数値計算ユーザ等に有効に利用されることが期待できる。

A Method of Computing of Difference 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 of the dynamical worlds. The similar calculations have been realized based on the Object Oriented paradigm. These both results have not always been satisfactory. In the present paper, a transformation model out of the mutual dynamical interactions in the real world up to the message-passing scheme in the the message passing mechanism in the program based on the difference equation calculations. The message-passing model has been applied to the one-dimensional shock flow

problem using the Object Oriented description language OOJ. Finally the Java program has been obtained throughout this integrally consistent processes, and executed. The results are confirmed to be reasonable. This message-passing model is expected to make the user load of the programming rather lighter than usual.

1. はじめに

物理世界における現象の相互作用^{*1}の支配方程式として知られる微分方程式を近似方程式に書き直し、計算機で計算するための空間や時間を微少な単位に離散化して数値的な計算を行うことは広く知られている。その微小空間単位の間相互作用を表す近似モデルの一つが差分方程式である。一方で、数値的な計算を行うその計算機の世界におけるもう一つの離散的なモデル化の手法として知られているのがオブジェクト指向パラダイム(考え方)である。

このパラダイムにおいても自然現象を離散的にモデリングし、離散単位とするオブジェクトを抽出し、相互関係を付けて対象世界の構造を表現することは以前から良く知られており、その仕組みに基づいた自然現象のシミュレーション¹⁾⁻⁴⁾や工学的解析、数値計算も行われてきている^{5),6)}。

たしかに上記の両計算方式とも十分に計算可能であり、計算結果も妥当であるという点から見れば合目的的でもある。しかし、両者は形式的に離散化と構造化を共通項とするのみで、オブジェクト指向の方法と微分方程式(=本論文では差分方程式)を数値計算的な観点から結び付けただけの計算法が少なくなく、必ずしもオブジェクト指向の方法の特徴を十分に生かした忠実で最適な計算方式やプログラムであるとは言えない部分がある。

そこで、本論文では微分方程式の表現する対象世界の相互作用と計算機世界のメッセージパッシング(以降 mp)の仕組みをよく生かし、より自然な表現法となるようなオブジェクト指向パラダイムを用いたモデリングとプログラミングの定式化の方法を提案する。次に、

^{†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 本論文で用いる相互作用とは力学的な作用・反作用である。ソフトウェア工学では、システム内のオブジェクト間のシグナルの送受信も相互作用として使われているが、本論文では区別のため、これをメッセージパッシングとする。

これをより有用な仕組みに組み立て、数値計算ユーザ等にも簡単に活用できる様な形式を確立するために一つのモデルを提案する。

それにより、自然現象等の力学的な微分方程式の最適な計算方式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、力学現象の解析やシミュレーション等を自身の専門(ドメイン)にする人達(本論文ではこれらの人々をドメインユーザと呼ぶ)に有効かつ有用なモデルとその応用方式を提案したい。

2. 離散化された微分方程式の従来型計算法

2.1 対象とした力学現象とその離散化モデル

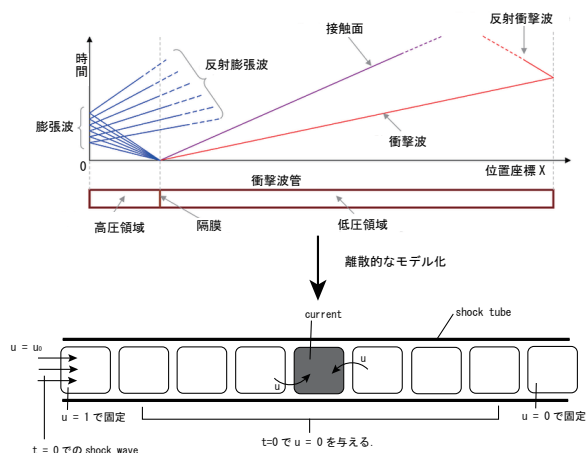


図1 一次元衝撃波管内の流のイメージとその離散化モデル
Fig.1 Image of One-dimensional Shock Tube Flow and Its Discrete Model

本論文で取り上げる対象世界は衝撃波管内流れを単純化した「一次元衝撃波流れ」⁷⁾であり^{*1}、その概略を図1を示す。流れは微小なセルと呼ばれる空間で分割される。この離散化

*1 実際の実験によく用いられて来た衝撃波管は、例えば直径が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、途中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さを経て垂直衝撃波が立ち上がる。衝

も通常行われる手法である。この対象世界を取り上げた理由は超音速流体力学の専門分野では広く知られている古典的な問題である事と計算式が簡単な差分方程式である、という事情にある。

2.2 離散化モデルと差分方程式の導出

標記の問題の計算方式に関しては、既に非常に多くの研究開発が多年にわたって行われて来ている。微分方程式は、非線形ではあるが空間に対して一次元である。

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

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

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

(1), (2) 式は圧縮非粘性流れを表すオイラー方程式である⁷⁾。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ス方程式(3)であり、これを扱う対象の微分方程式とする。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⁷⁾。このLax-Wendroffの方法を実際に用いた式は(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。この式において速度の変数 $u(i)$ が現時点の u の値で u_p は予測子の値、 u_c は修正子の値で次の Δt 後の時点の u の値 u_{next} を持つ。 C_n とは Courant 数で、 $C_n = \Delta t / \Delta x$ である。

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

$$u_c(i) = u_{next}(i) = u(i) - C_n \{ u_p(i) - u_p(i-1) \} \quad (5)$$

2.3 流れの離散モデルと従来型の計算方式

前節で導かれた差分方程式を用いる一次元衝撃波流れを図1に、その離散モデルを図2

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、右端まできたらダンプ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。

に示す。一次元衝撃波流れが左端より進入し、衝撃波管内部を一定の速度で伝搬する。そこで空間を図2の様に微小な幅のセルに分割し、これをオブジェクトと設定する。

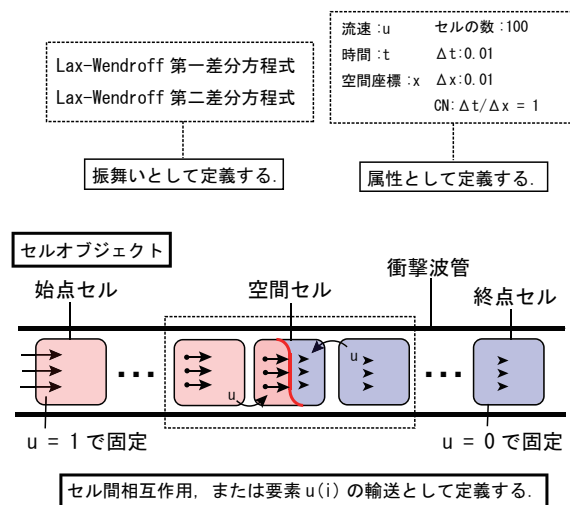


図2 離散化モデルとオブジェクト指向要素の対応
Fig. 2 Correspondence of Discrete Model with Object Oriented Elements

計算方式の概念図を図3(a)~(d)に示す。図3は(a)から順に手続き型プログラミングからオブジェクト指向プログラミングに至るまでの幾つかの段階を代表している。まず従来型の手続き型計算方式を図3(a)に示す。この図から分かる様に各セルの物理量(ここでは流れの速度 u)を共有配列 (Fortran であれば COMMON 等)に宣言し、各セルの差分方程式はこの共有配列から u の値を参照しては自身の次の値を計算する、という方式を取る。

次に、オブジェクト指向言語なども使われることもある Solver 型のプログラムの計算方式⁸⁾を図3(b)に示す。この計算方式は u の計算処理の主体となるモジュールが通常 solver と呼ばれるプログラムによって大部を占められ、機能毎に分けられている。

図3(c)はオブジェクト指向型の計算方式である。この方法は従来から行われてきた差分方程式を各離散単位であるセルオブジェクトに配置し振る舞いとしての上記差分方程式を設定したオブジェクト指向に則った計算方式である。(d)は本論文の提案モデルなので第3章で引用する。)

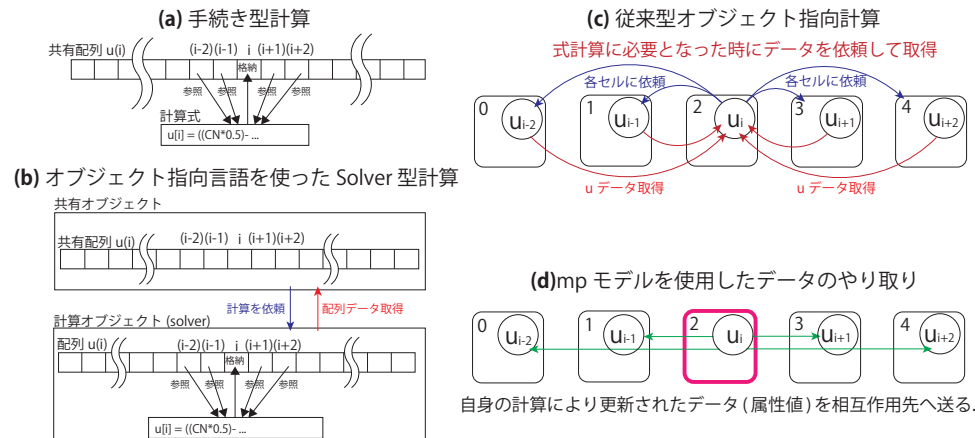


図3 差分方程式のデータ取得の方法
Fig. 3 Various methods of data acquisition for Difference Equation

3. 相互作用の一般的取扱い法と mp モデルの提案

3.1 相互作用から相互作用情報伝達 (= mp) への変換

離散モデル化された世界とは、離散単位が相互作用をしながら動く世界なので、それに応じて内外部を峻別した振る舞いが必要とされる。それが内部振る舞い*1と相互作用の2つである。両者は内容と形式共に大きく異なるので、最初に切り分け/切り離しておく必要がある。そして自身の内部振る舞いを使って相互作用の大きさ等を計算し、その力学的な作用と反作用の相互作用情報 (message) を相手に伝達する (passing) ためにメッセージパッシングの方式を用いる。

3.2 mp モデルの一般構成

本節では相互作用の分析と mp の再構成の方法をより具体化して mp モデルとし、図4にその全体の概要を示した。

*1 内部振る舞いとは離散単位 (この場合はオブジェクト) の内部の属性の変更だけが行われるに留まる振る舞いを指す。

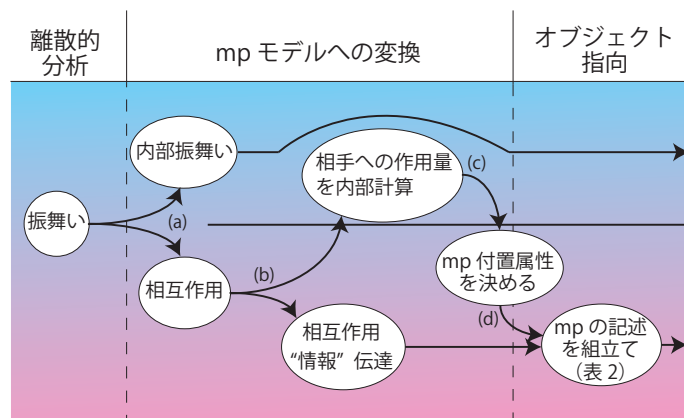


図4 mpモデルに基づく一般的な変換作業の概要
Fig. 4 General Transformations Operations based on mp Model

第一段階：相互作用をドメインユーザ自身で詳細に分析し、図4(a)の様に内部振る舞いと相互作用とに分離し、複数の逐次的な振る舞い記述の並び(sequence)の形式に書き換える。この作業は相互作用の内容に精通するドメインユーザに一任される。

第二段階：当初からの内部振る舞いについては変更はない。もう一方の相互作用は図4(b)の様にその内容に依って更に内部振る舞いと相互作用「情報」伝達とに分析し・切り分け・記述変換する。相互作用から分離・切り離される内部振る舞いとは図4(b)にあるように相互作用の相手に対する作用の大きさの量や特性を計算するための内部振る舞いである。この内部振る舞いは不要な場合もある。

第三段階：図4(b)で分離された内部振る舞いは、実体は相手に送る自身からの相互作用の量(もちろんそれに相応する属性値の情報/データを指す。)の計算である。一般にどのような内部振る舞いを計算として行うかの内容はドメインユーザに一任される。その計算結果は図4(c)の様にmpに付置される属性として纏められ、図4(d)の様にmpの記述に組み立てられる。

この様に力学的な相互作用(相手への作用)をいかに「相互作用情報」に変換し、それをmpに変換するための変換作業モデルが、図4に示すmpモデル(message passing model)の主要部である。mpモデルのmpは一般に以下のような情報の構成が必要である。まず、例を挙げると

(例 上流セルの衝撃波速度を取得する mp << 2:上流セル [2-1])
(例 (上流セルの衝撃波速度))

- (1)mp であることの表示 1行目はmpの主文と呼ぶべき文で、mpの内容を表す。
- (2)mpの方向 その右端に相互作用情報伝達であることを表示する“mp”とメッセージをパッシングの方向を示す矢印を書く。矢印にはギューメ(ギルメット, >> or <<)を用い、尖った方向がメッセージが伝達される方向を表す。
- (3)mpの相手先の一意特定 mpの相手方を一意特定する方法 mp相手の離散単位名等
- (4)mpと共に送られる属性情報 伝達する属性情報は上記例の様にmp主文の直下に纏めて付置する。

これらの情報を相互作用から改めて分析抽出(モデリング)すれば良い。

3.3 陽的な差分方程式の場合のmpモデルの構築

本節では、微分方程式を数学的に近似式に離散化した差分方程式に対して具体化する。陽的な差分式であれば(6)式のように他の離散単位に関わる属性値の一次結合で表される*1。A_kは差分化の際に現われる係数である。P_nは離散単位の一連番号nの点Pの物理量等の属性(物理世界で言えば、密度、速度、温度、熱流等)を表す。P_nを属性とすると、時間と空間座標の1次結合の関数として表現できる。(典型例としてはポアソンの微分方程式など。)

$$P_n = \sum_k A_k * P_k \quad (6)$$

下添え字のkは相互関連を持つ他離散単位を指している。A_kは採用する差分公式によって予め決まっている。ポアソンの微分方程式を差分化すると、四つある隣接セルに関わる全ての係数が1/4となる。(6)式は右辺のP_kの属性値がmpによって予め送られて来ていることを前提として、自身の内部状態の更新計算を行うことを表す式である。

*1 陰的な差分方程式は連立方程式として表され、各個別の離散単位が各自個別に自身の属性を更新する方式の計算方式には持ち込み 難い。これではオブジェクト指向本来の特長や良さは失われてしまう可能性が高い。対象世界の相互作用の特性に応じて使い分けられるべきであろう。現時点では対策案はあるが未だ詳細を検討中である。

まず本論文において差分方程式は図2の様なセルモデルを想定すれば、変数(属性)である衝撃波速度 u の複数のセル間の代数的な相互作用式という一種の相互作用を表す式として捕らえることできる点が重要な観点である。

この差分方程式を離散単位(本例ではセル)間の「物質、速度、エネルギー等の輸送」の等価な代替として『属性値情報(速度 u 等)の伝達』の相互作用式と解釈する。これは差分方程式が実世界における相互作用を表現する式であることを指している。

周辺の離散単位の属性値を mp を使って送り、このような差分式によって自身の属性値を更新し、その更新された属性値を関連離散単位に配送する、という振る舞いを続ける。これは自身の変更/更新が他に自然と影響を与えることについての計算式的な処置表現である。これが図2(d)のモデルである。この様に mp を使うことでセル間で相互作用が伝達される。

差分方程式では既にどのセルと相互作用を行い、どのセルに対して自身の P_k を送れば良いかが式の中で示されているので簡単に mp モデルを構築できる。図5にその概略を示す。図5(A)では、離散単位の振舞いを自身の内部の振舞いの記述と、相互作用を司る相互作用

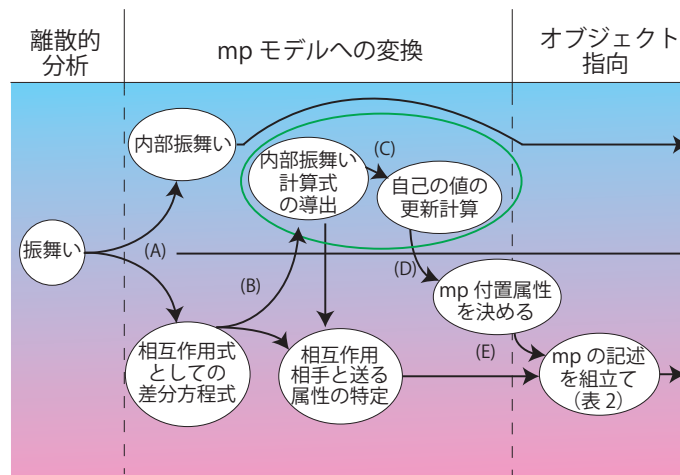


図5 mp モデルに基づく差分方程式の場合の変換作業

Fig.5 Transformations of Difference Equation type mp model based on Message Passing Model

式としての差分方程式に分かれる。図5(B)においては差分方程式(6)から相互作用相手とそれへ送る属性を特定する。一方では差分方程式(6)を自身の内部振舞いの計算式と見なし

図5(C)において自身の更新値を計算する。その値を含めて図5(D)において付置属性の値を決定し、図5(E)において表2を用いて mp の記述を組み立てる。この順によりオブジェクト指向の内部振舞いと相互作用の記述が完成する。

3.4 mp モデル構成の纏め

mp モデルは離散的に分析されたモデル(一次元衝撃波で言えばセルモデル)をオブジェクト指向パラダイムに基づく記述へと変換するためのモデルである。したがって、主要部分は図4または図5で表されているが、全体構成を示すと次のようになる。

mp モデルの全体構成

1. 離散的なセルモデル等の分析モデルを作成(記述)する。
2. 相互作用の部分の記述を図4または図5に従って変換し、mp の記述に組み立てる。
3. オブジェクト指向プログラミングの方法(本論文では OOJ)に従って、システムティックにプログラムに至るまでの作成と変換を行う。

以上、主要部分は確かに第2項であるが、前後の第1と第3の項目も実現されてはじめて本来の有効性が発揮できる状況になると共にドメインユーザにとって有用な方法あるいはモデルとして利用可能になる。

mp モデルとして図4と図5の二種類の mp モデルを提案した。二つのモデルの変換作業は図4が一般的なモデルであり、図5は抽象化すると図4に統合される。この図4の mp モデルを基本にすれば図5の様に特化したモデルを作ることができる。方程式支配の現象ではなく、何らかの再現シミュレーションモデルを構築した場合も、この一般的な mp モデル図4を基本モデルとして用いることで離散的な現象をオブジェクト指向プログラミングの枠組みに移行させることができる。

4. 分析からプログラムまでの一貫適用記述例とその考察

本章では mp モデルがどのように適用され、どう変換されて行くかを中心に述べる。その具体的な適用作業全体も mp モデルの中でのプログラミング面での重要部分(前節の第3項)を構成する。

4.1 mp モデルの表現系としての OOJ

前節までに提案した mp モデルを使った一次元衝撃波の分析記述を作成してプログラムに至るまで変換するには適切な記述方法が記述言語が必要である。本論文ではオブジェクト指向記述言語として開発された OOJ⁹⁾ を用いる。OOJ の内部は分析、設計、実装の各段階に分かれている。最初は実世界を正確に分析して記述するための記述言語 OONJ¹⁰⁾、一般のプログラムにまで変換する仕組みが設計記述言語 ODDJ¹¹⁾ 実装記述言語 OPDJ¹²⁾ であり、更にそれらの分析・設計・実装の記述間の変換を行う三つのトランスレータから構成されている。

4.2 一次元衝撃波流れの分析段階の記述

図 6 は第 2 章で述べた一次元衝撃波流れのセルモデルに対応する空間セルの分析段階の記述を示す。空間セルは両隣のセルに必要な速度 $u(i-1)$ や $u(i+1)$ の速度を用いて、自身の Δt 後の衝撃波速度 $u(i)$ 計算を行っている。その後で、関係するセルへと自身の新しい $u(i)$ の値をメッセージで送っている。これで mp モデルが記述できたことになる。

分析段階の OONJ ではこの記述の様に、対象世界の相互作用に関する必要な全てのデータが明示的に記述されることが必要十分条件である。この記述が完成すれば設計及び実装段階へ進むことができることになる。

5	fn3.3	予測子速度を求める。	
-1	注釈	このセルの衝撃波速度が初期化されていることが前提。	
-2	注釈	上流の空間セルから影響を受けていることが前提。	
-3	fn3.1	衝撃波予測子速度 = $0.5 * ((1-CN) * 上流の空間セルの衝撃波速度) + (1.0+CN) * 衝撃波速度$	
6	fn3.3	修正子速度を求める。	
-1	注釈	このセルの衝撃波速度が初期化されていることが前提。	
-2	注釈	下流の空間セルから影響を受けていることが前提。	
-3	fn3.1	修正子速度=衝撃波速度 - (CN*(予測子速度-下流の空間セルの衝撃波速度))	
-4	fn3.1	衝撃波速度 = 修正子速度	
-5	fn3.2	上流の空間セルへ影響を与える。	>mp> 3:空間セル[3]
-6	fn2.2	(衝撃波速度)	
-7	fn3.2	下流の空間セルへ影響を与える。	>mp> 3:空間セル[4]2:終点セル[3]
-8	fn2.2	(衝撃波速度)	

図 6 mp モデルを使用した分析段階での記述

Fig. 6 Description using message passing model on analysis stage

4.3 一次元衝撃波流れの Java プログラムまでの作業

設計及び実装の段階では Lax-Wendroff の差分方程式が当初の分析段階からよく利用される数式の形式で書かれており、かつ本 OOJ に適合する形式で記述されていたので、変更は

なかった。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。よく使われる数式であれば、OOJ の仕様に適合しているので、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。

図 7 は分析記述を基にした Java プログラムである。図 6 と比較すればその対応する部分が見出され、整合性のとれた記述とプログラムを構成している事が分かる。このプログラムも実行可能であり、コンパイルされて実行された。計算結果は Monte-Carlo 計算の結果と比較され、Lax-Wendroff の差分方程式の精度を考慮すると、一致度は比較的に良い結果として得られた。

```

82  <<
83  >> /!<<
84  >> * 予測子速度を求める <<
85  >> */<<
86  >> public void calcPredictor(){<<
87  >> //このセルの衝撃波速度が初期化されていることが前提.<<
88  >> //上流の空間セルから影響を受けていることが前提.<<
89  >> //衝撃波予測子速度 = 0.5*((1-CN)*上流の空間セルの衝撃波速度)+(1.0+CN)*衝撃波速度)<<
90  >> predictor_u = 0.5*((1-attr.CN)*upper_cell_u)+(1.0+attr.CN)*u;<<
91  >> }<<
92  <<
93  >> /!<<
94  >> * 衝撃波速度を求める <<
95  >> */<<
96  >> public void calcCorrector(){<<
97  >> //このセルの衝撃波速度が初期化されていることが前提.<<
98  >> //下流の空間セルから影響を受けていることが前提.<<
99  >> //修正子速度=衝撃波速度-(CN*(予測子速度-下流の空間セルの衝撃波速度))<<
100 >> corrector_u = u-(attr.CN*(predictor_u-downer_cell_u));<<
101 >> //衝撃波速度=修正子速度<<
102 >> this.u = corrector_u;<<
103 >> //上流の空間セルへ影響を与える.<<
104 >> upper_cell.infrectionFromDownerCell(u);<<
105 >> //下流の空間セルへ影響を与える.<<
106 >> downer_cell.infrectionFromUpperCell(u);<<
107 >> }<<
108 }<<

```

図 7 mp モデルを使用した Java プログラム

Fig. 7 Java program using message passing model

5. 考察と比較評価

5.1 mp モデルの有用性の議論

本論文で提案した mp モデルは、オブジェクト指向をよく知る人にとっては少なくとも個々の変換作業や技法は常識的な知識ではあるであろうことは想像に難くない。しかしそれらがドメインユーザにとって常識的な知識や技術であるか？、については我々の経験的知識としては No である。つまり、ドメインユーザは OO パラダイムに基づく数値シミュレーション法、特に相互作用の扱い方を総合的に提示された経験はあまり無いであろうというのが mp モデル提案の発端である。そこで、mp モデルという明示的な形で分析の始まりからプログラムへの変換の終わりまでドメインユーザ向けに提案したのである。

本 mp モデルは、

- (1) ドメインユーザが容易に理解・利用・成果を得るための「オブジェクト指向を利用する技法」として、
- (2) 離散化からプログラムの完成までの OO パラダイムに基づく定式化からプログラムまでの方法の過程全体を理解するためのモデルとして

役立つ有用性を狙いとしているからである。図 8 にその全体像を示す。図から当初はドメインユーザの専門知識である離散化分析に始まるが、mp モデルを使うことで、オブジェクト指向プログラミングの路線に変換される、そのことにより、分析段階以降の広い意味でのプログラミング作業の負担が大きく減少することが期待できるようになる。このようなオブジェクト指向技術のメリットを享受して貰うのが mp モデルを提案する目的である。

5.2 関連他研究との比較評価

本論文で提案した mp モデルを利用すればプログラムに至る道筋が容易に示されるという力学的/数学的なモデルとプログラムに繋がる計算機世界のモデルの関係をに変換する方法を提案した関連他研究を探索した。

例えば、Modelica¹⁵⁾ 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¹⁶⁾、モデルシミュレーション技法¹⁷⁾、Zeigler²⁾ や Jerry³⁾ 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に関する詳細には触れていない。

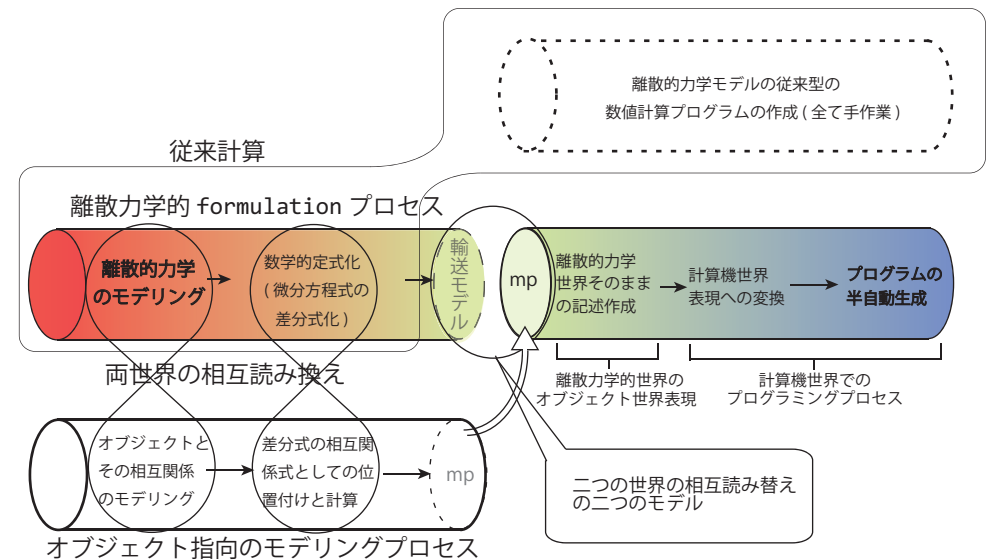


図 8 離散的な力学世界とオブジェクト指向世界の比較

Fig. 8 Comparisons between Discrete Dynamic World and Object Oriented Worlds

結論としては、物理モデリングやそれを巧く扱うための言語、オブジェクト指向の概論的な書物が殆どで直接の比較評価は出来なかった。

6. 結論と今後の課題

力学的な対象世界を分析し、その微分方程式を近似的に離散化した差分方程式を相互作用式として解釈し、mp モデルとし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かつ形式的に記述できるモデルを提案した。その mp モデルを簡単な対象世界に適用し、オブジェクト指向記述言語 OOJ を使って記述し、分析と設計・実装の各段階を経て 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、mp 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す。

もう1つは、ドメインユーザ向けの課題として、我々の研究グループが以前に開発したオブジェクト指向に基づく自動分散化システム¹⁸⁾と自動並列化¹⁹⁾のシステムへの接続がある。これはトランスレータの改訂で導入可能であるので、再稼働に向けて取り組みたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Goldberg, A., Robson, D., 相磯秀夫監訳, SMALLTALK-80 - 言語詳解 -, オーム社 (1987).
- 2) Zeigler, B. P., Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models, ACADEMIC PRESS, INC. (1990).
- 3) Jerry Banks (ed.), Handbook of Simulation, Principle, Methodology, Advances, Applications, and Practice, John Wiley & Sons, Inc. 1998
- 4) M. Hatakeyama, M. Watanabe, T. Suzuki, "Object-oriented Fluid Flow Simulation System", Computers and Fluids, Vol.27, Nos.5-6, pp.581-597,1998.
- 5) 「オブジェクト指向と計算力学」, 「計算力学におけるオブジェクト指向アプローチ」, 日本機械学会第六回計算力学講演会論文集, pp.35-60, (1993).
- 6) 日本計算工学会誌「計算工学」, 1-2, 5/30 (1996).
- 7) 日本機械学会編著, コンピュータアナリシスシリーズ4, 流れの数値シミュレーション 第2章, コロナ社, 1988.
- 8) 峯村吉泰, 流体・熱流動の数値シミュレーション, 森北出版株式会社, ISBN4-627-91751-1.
- 9) 大木幹夫, 片野克紀, 三塚恵嗣, 沼崎準一, 涌井智寛, 加藤木和夫, 池田陽祐, 島山正行, 三言語独立のオブジェクト指向記述言語 OIJ の実装と検証, 第 163 回 SE 研究会報告, 2009-SE-163, pp.49-56, (2009).
- 10) 島山正行, オブジェクト指向自然日本語記述言語 OONJ の設計とその記述力の評価, 第 58 回 MPS 研究会報告, 2006-MPS-58, pp.59-62, (2006).
- 11) 島山正行, 川澄成章, 野口和義, オブジェクト指向ドメインユーザ計算設計記述日本語 ODDJ とその記述特性, 第 61 回 MPS 研究会報告, 2006-MPS-61, pp.61-64, (2006).
- 12) 加藤木和夫, 島山正行, 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) 島山正行, Monte-Carlo 法及び Two-stream Moment 法の精度評価, 東京都立航空工業高等専門学校研究紀要, 第 19 号, pp.57-66, 昭和 57 年 8 月.
- 14) Schmidt, B., "Electron Beam Density Measurement in Shock Waves in Argon", J. Fluid Mech., Vol.39, part 2, pp.361-373, (1969).
- 15) 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.
- 16) 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).
- 17) 有沢誠, 齊藤鉄也, モデルシミュレーション技法, 共立出版, 1997 年 7 月.
- 18) 上原均, 島山正行, オブジェクト指向シミュレーションの自動分散化の実現と評価, 日本シミュレーション学会誌, 17-4, 310/323 (1998).
- 19) 上原均, 島山正行, オブジェクト指向 CFD シミュレーションの並列化システム, 日本シミュレーション学会誌, 19-2, 128/142 (2000).