1版

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　２ 年　６ 月　６ 日現在

機関番号：１７１０２

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：１７Ｈ０１７５０

研究課題名（和文）逐次問題の並列計算の数理とフレームワーク研究開発・実証

研究課題名（英文）Mathematical research for parallel computing of sequential problems and its development of framework

研究代表者

小野　謙二（ONO, KENJI）

九州大学・情報基盤研究開発センター・教授

研究者番号：９０３３４３３３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　14,300,000円

研究成果の概要（和文）：多くの科学技術計算に現れる時間発展問題は状態変化の時間方向への依存性から並列化が困難とされてきたが、時間並列計算法はその問題点を緩和できる。この計算法は単に時間発展問題を並列化できるだけでなく、逐次性をもつ計算全般を並列化する汎用的な計算法を示している。逐次計算全般の並列化の数理研究を進め、逐次問題を反復形式で表現し、時間並列計算法を適用することにより、並列処理が可能なことを確認した。また、 並列化を支援する汎用フレームワークの研究開発を進めるとともに、チュートリアルを作成し公開することにより、計算工学の諸分野へ貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
これまで並列化の導入が困難であった逐次計算に対して、新しい並列化の軸を導入した並列処理の方法を提案し、その基礎と数理的解釈を理論的に明らかにすることだけでなく、具体的な応用に役立つ基本的な問題を例題として準備した。時間並列計算の考え方を普及するために、本研究の成果として書籍を執筆中である。これにより、これまでは難しかった変動現象の長時間計算が短時間で計算できるようになり、現象の新しい知見がえられる。また、計算時間の大幅な短縮により、不確かさの定量化や設計パラメータ空間探査などの効果的な利用法を実現し、ものづくりの高度化を推し進めることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The time evolution problem that appears in many scientific and technological computations has been recognized that it was difficult to parallelize because of the dependence of state changes on the time direction, but the parallel-in-time (PinT) computing approach can alleviate the problem. This calculation method shows not only parallelization of time evolution problem, but also general-purpose calculation method that can parallelize almost sequential computations. It was confirmed that parallel processing is possible by advancing the mathematical research on parallelization of general serial calculation, expressing the serial problem in iterative form, and applying the PinT. We also contributed to various fields of computational engineering by advancing research and development of a general-purpose framework that supports parallelization, and creating and publishing tutorials.

研究分野：計算科学

キーワード：並列計算　時間並列計算　Parareal法　放物型方程式

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

2001 年の J. –L. Lions らによる Parareal 法の提案から時間並列計算法の研究は活発化している。この研究領域は欧米での数理研究が先行しており、近年、性能向上へ向けた研究も増加している。日本では申請者らのグループが応用へ向けて研究を進め、実用化に近づきつつある。Parareal 法を基にする時間並列計算法は、図 1 に示すように

a) 全計算時間を部分時間領域に分割、
b) 領域毎に仮の初期値を設定、
c) 各領域で並列に領域内の逐次時間積分を実施、
d) 反復毎に生じる領域 n-1 の終端時刻の値と領域 n の始端時刻の値の食い違い量（修正すべき量）を計算、
e) 食い違い量の伝搬計算を粗視化積分演算により行い修正量を計算、
f) 修正量を用いて各領域の開始/終端時刻の値を修正。

以上の計算を反復して解を求めるという共通の計算手順を持つ。ここで粗視化積分演算とは、時間発展方程式を大きな時間積分幅で時間進行し、領域端点での修正すべき量を次の領域端点へ伝搬させる計算である。我々は、粗視化積分演算法が収束に与える影響評価[5]や反復計算における粗視化積分演算法の試行[4]の結果から、この計算法は単に時間発展問題の並列計算を可能にするだけではなく、逐次計算問題を並列化する汎用的計算法として利用でき、逐次問題全般に対して幅広く応用できると考えた。手順(e)は逐次時間発展計算の並列計算のために導入された時間並列計算の反復計算を収束させる鍵である。すなわち、その主な要素である粗視化積分演算の構成を研究することが逐次計算の並列化において最も重要となる。粗視化積分演算には、並列性能向上の点からは計算負荷が小さく反復回数が少ない高次精度の積分法が適しているが、それだけではなく安定性や位相誤差なども考慮する必要がある。この粗視化積分演算に関して、問題の特性に応じて収束性・計算量・計算速度（実装も考慮）の点で最適なものを開発すれば、異なる種類の逐次計算問題へ応用できる。逐次計算のタイプには、時間発展型、行列演算反復型、条件判定状態推移型、グラフ探索型、ニューラルネット学習型など多くの種類がある。そこで本研究では、主に、以下の３つのタイプに着目する。

① 時間発展型：基底次元低減法は、時間発展計算を空間方向に離散化した有限次元基底空間において基底数を減らした低次元時間発展方程式に変換し、所望の精度を維持しつつ計算負荷を下げる。しかし、時間発展は逐次計算であるため、性能は飽和している。
② 行列演算反復型：シミュレーション全般で重要な線形計算（線形方程式や固有値解析）の逐次反復解法では、計算法やその並列実装の工夫による演算性能の向上は大きいが、空間領域分割計算における並列性能は MPI 通信の同期処理のために飽和傾向にある。
③ 条件判定状態推移型：交通流シミュレーション、虫や鳥の群れなどの自己駆動粒子系の状態推移計算（逐次計算）で広く使われる不連続な相互作用・非定常性・不均質性の導入により、空間的影響域が変化する場合がある。このとき、前もって局所性の範囲を仮定できないためプログラムが最適化しにくく、空間並列による性能向上が困難な場合がある。

このように、多くの実問題で逐次計算の並列計算への転換が切望されている。

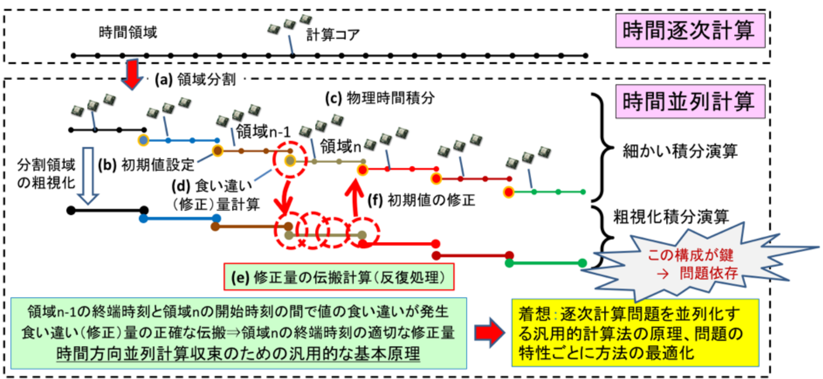

図１　本研究の背景

２．研究の目的

時間発展問題は解の時間方向への依存性から、並列化による加速が困難とされてきた。我々は 2001 年に提案された時間並列計算法の研究を通して、この計算法は単に時間発展問題を並列化できるだけでなく、逐次計算全般を並列化する汎用的な計算法を示しており、逐次計算に対して幅広く応用できるとの認識を得た。そこで、本研究では、

A) 逐次計算全般の並列化の数理研究
B) 逐次問題の並列化を支援する汎用フレームワークの研究開発
C) 具体的な逐次計算問題へのフレームワーク応用

について取り組み、時間発展計算を含む逐次計算の汎用的な並列計算法を提案することを目的とする。これは従来困難であった遂次計算の実行時間短縮に役立ち、計算工学分野へ大きく貢献

する。

３．研究の方法

時間発展計算を含む逐次計算を並列化する計算法の数理研究に基づき、汎用的なフレームワークを開発し、これを多くの種類の逐次問題に応用するため、下記(A)〜(C)の実施項目を設ける。

(A) 逐次計算問題を並列化するための数理の検討・アルゴリズム化

(B) 並列アプリ構築のための汎用フレームワークの検討・実装

(C) 開発フレームワークの具体的な逐次計算問題への適用・実証

研究推進にあたり、サブグループ毎に集中的に研究を進めるとともに、グループ間で相互に連携しながら成果をまとめる。研究成果はオープンソースソフトウェアとして公開し、他の研究へ貢献する。また、先行している欧州の研究者と連携し、国際的なプレゼンスを高めていく。

４．研究成果

初めに、フェーズフィールド法を対象に非線形収束制御法による時間並列計算法のさらなる加速法を検討した。フェーズフィールド方程式として、Allen Chan 方程式(式(1)+(2))と修正 Allen Chan 方程式(式(1)+(3))を対象とした。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = f_*(\phi), \tag{1}$$

$$f_{AC}(\phi) = D\nabla^2\phi - K\phi(\phi-1.0)(\phi-0.5+\beta), \tag{2}$$

$$f_{MAC}(\phi) = \partial x\left[\left\{D^o - k\frac{\phi(1-\phi)}{|\partial_x\phi|}\right\}\partial_x\phi\right] \tag{3}$$

ここで φ はスカラー物理量、D と D^0 は拡散の強さ、K は非線形項の強さを表すパラメータである。非線形収束制御法は、時間並列計算反復中に非線形反復・線形ソルバーの収束閾値を適切に制御し、無駄な計算量を削減するとともに、できるだけ早めに更新値を線形ソルバーから非線形ループへ、非線形ループから Parareal 法の反復ループへ戻して収束性を改善する手法である。図 2 中の値 a が非線形反復ループの打切り判定値 ε^{NL} である。値 b は、線形ソルバーの反復ループの打切り判定値を ε^{LS} =(1/CSL)^(K^{par})と決めるための値 CSL である、ここで K^{par} は Parareal 法の反復数である。試行の結果、粗い計算結果で早めに更新値を非線形反復ループへ戻す方が良いということが分かった。非線形判定値との調整と組み合わせるとさらに Parareal 法を加速できることも分かった。

次に、双曲型偏微分方程式に対してナビエストークス方程式と波動方程式を対象に、我々が開発した緩和型 Parareal 法の効果を評価した。問題は図 3 上段に示す、ナビエストークス方程式では 2 重せん断周期流（2 次元差分法、移流計算は TVD 法、時間積分は Forward Euler 法）を、波動問題では、多重マスバネ振動（多自由度質点系を Newmark-β 法で時間積分）と構造解析による梁の振動（有限要素法による空間離散化方程式を Newmark-β 法で時間積分）を対象とした。

本研究で用いる Parareal 法では時間領域[0, T]を Nts 個の time slice と呼ばれる分割された時間領域[T_{n-1}, T_n]（これは番号 n の time slice を示す）に分割して、反復 K^{par} 回目の time slice n の始端値 U^{Kpar-1}_{n-1} に仮の初期値を与えて、上記の計算モデルで示した計算コード（Fine solver と呼ぶ）でその time slice 内で時間発展計算を並列で行い仮の time slice n の終端値 U^{Kpar}_{n} を得る。ここで、t=T_n に着目すると U^{Kpar}_{n} は time slice n の終端値で U^{Kpar-1}_{n} は time slice n+1 の始端値である。本来はこの２つの値は一致しなければならないが、反復計算中では不整合があり一致していない。また time slice 数は時間並列の数でもある。ここで U は上記問題の time slice の始端値、終端値を一般的に表す変数であり、それが Parareal 法反復計算での未知数となる。Fine solver では本来計算したい計算モデル、条件、細かい時間刻み幅 δt で詳細な計算を行う。Fine solver による計算の結果、time slice n の終端値 U^{Kpar}_{n} と time slice n+1 の始端値 U^{Kpar-1}_{n} に食い違いが出る。この食い違い量は誤差なので、それを減じるように Coarse solver という収束用の計算で time slice n=1 から Nts（Nts は並列数でもある）まで逐次的に修正計算を行う。Coarse solver は Fine solver と同じものを使って粗い時間刻み幅 δT>>δt を用いたり、計算モデルや離散化法を粗くしたりして計算負荷を減じた計算を行ない低コストで修正計算を行うものである。以上の計算プロセスは Newton-Raphson 法をベースに次式のように定式化される。

$$\mathbf{U}_n^{K^{par}} = F(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par-1}}) + G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par}}) - G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par-1}}) \tag{4}$$

ここで F, G はそれぞれ Fine solver、Coarse solver による計算を表し、time slice n の K^{par-1} 反復目の始端値 U を使って time slice n: [T_{n-1}, T_n]において時間発展計算を実行した結果を意味している。この Parareal 法の計算は次のように実行される。

1. Parareal 法反復計算の初期値 U^0_n を coarse solver を用いて時間領域全体[0, T]について時間発展計算（逐次計算）により求める。
2. はじめに fine solver F(T_n, T_{n-1}, U^{Kpar-1}_{n-1})を time slice n: [T_n, T_{n-1}]で実行（並列計算）する。
3. つぎに Coarse solver G(T_n, T_{n-1}, U^{Kpar}_{n-1})を time slice 1 から time slice n までを順次計算する逐次計算で実行する。Time slice n での Coarse solver G(T_n, T_{n-1}, U^{Kpar}_{n-1})による時間発展計算の

後、$U^{Kpar}{}_{n}$を式（4）にによりて更新する。この$U^{Kpar}{}_{n}$の更新は、前の time slice の値$U^{Kpar}{}_{n-1}$が計算されていなければ計算できないので逐次計算となる。式（4）の右辺 2 項で用いられる値 $G(T_n, T_{n-1}, U^{Kpar}{}_{n-1})$ は Parareal 法の反復 Kpar 回目の値$U^{Kpar}{}_{n-1}$を用いた値である。

4. Steps 2 と 3 を$U^{Kpar}{}_{n}$ が収束するまで反復する。

また、Parareal 法の改善として緩和法を導入した緩和型 Parareal 法を開発した。Parareal 法は、time slice の端点の値を未知数とした非線形方程式の解法を Newton-Raphson 法で定式化し、修正値を求める。その線形方程式の左辺の正確な計算が不可能なことからその計算に大胆な近似を使っている。そのため準 Newton-Raphson 法に基づく計算法と言ってもよい。緩和型 Parareal 法は、Coarse solver で計算される修正項に加速・減速処理を行い、収束性を改善したものである。それは式 (4)で Coarse solver からくる修正量に減速係数 γ を使い、Newton-Raphson 法の修正量に減速係数 β を使うことにより、式 (5)と変更したものである。

$$\begin{aligned}\mathbf{U}_n^{K^{par}} &= (1-\beta)\mathbf{U}_n^{K^{par}-1} + \beta F(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par}-1}) \\ &+ \gamma(G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par}}) - G(T_n, T_{n-1}, \mathbf{U}_{n-1}^{K^{par}-1}))\end{aligned} \tag{5}$$

次に、提案手法の効果について説明する。Parareal 法は高い性能が期待できるパイプライン化されたものを使った。それは各プロセスで Coarse solver の実行が終了した後、修正処理ステップの完了を待つことなく直ちに Fine solver を実行するものである。Parareal 法の加速率 α は式 (6) のモデル式で評価される。それぞれの加速率 α の pipe はパイプライン化した Parareal 法の意味である。

$$\alpha_{pipe} = \frac{1}{K^{par}/N_{ts} + 1/R_{fc}} = \frac{N_{ts}}{K^{par} + N_{ts}/R_{fc}} \tag{6}$$

分母の第 1 項は並列処理部分を、第 2 項は逐次計算処理部分を表す。この時、Coarse solver では、積分時間ステップ幅 δT>>δt を用いて時間を粗視化するかその時間積分法を粗視化する等により、逐次計算負荷となるその計算時間 T_Gを削減する。Fine solver の細かい時間刻み幅 δt による計算時間 T_Fを使って時間粗視化率 $R_{fc}=T_F / T_G$を定義する。これは Parereal 法の逐次計算部分の負荷を表すパラメータとなっている。ここで、Fine solver と Coarse solver の time slice 当たりの計算時間比 $R_{fc}= T_F / T_G =1/Q\ R^t{}_{fc}$を時間粗視化率、$R^t{}_{fc} =\delta T/\delta t$ を時間刻み幅粗視化率、Q は Fine solver と Coarse solver の 1 ステップ当たりの計算時間の比である。

Allen Chan 方程式に対しての問題設定を図 4 に示す。ここで ϕ は 1.0 で固相を、0.0 で液相を示すこと、また β が正である場所は固相に、負である場所は液相になりやすいことを念頭におく。問題は 2 種類、図 4 の(a) 1 つの階段状、(b)複数の階段状の初期値問題である。物理条件で、時空間領域は両問題において同じ x = [0、1] ; t = [0、0.5]とし、物性値は D=1、K=16×102 ～16×102、(λ=K/D：相関の境界の厚みパラメータ)、問題(a)で β=-0.1、-0.01、-0.001、問題(b)で β は図 4 の(b)のようにした。数値解析条件は、両問題同じで、メッシュ数 Nx=1000、時間刻み幅 $\delta t=10^{-7}$ である。時間並列計算条件は、time slice 数 Nts=100、時間刻み幅粗視化率 Rtfc=100、250、500、Parareal 法の収束条件 $\varepsilon=10^{-8}$、時間積分法 Fine solver/ FE(Forward Euler)、Coarse solver/BD4(Backward Euler 4 次) である。その結果を図 2 に示す。これから比較的相間の厚みがあれば、非線形収束制御を用いた時間並列計算により約 40 倍程度の加速が期待できることが分かった。修正 Allen Chan 方程式に対しての場合も同様の調査を行い、14 倍程度の加速を得ることを確認した[1]。

2 重せん断周期流れ問題は、物理条件で Re:10000、空間領域は[0, 1]、時間領域 T=[0, 1](場形成の初期)、数値解析条件で格子数 Nx、Ny=50、時間刻み幅 $\delta t=2\times10^{-4}$ (CFL=0.03)、時間刻み数 5000 である。時間並列計算条件は time slice 数 Nts=10、時間刻み幅粗視化率 $R^t{}_{fc}$ =10、時間積分法 Fine/Coarse solver/ FE である。多重マスバネ振動問題は、物理条件で質量 100 個、両端固定、100 サイクル、中央の質量に初期変位、数値解析条件で 100steps/周期、10000steps である。時間並列計算条件は time slice 数 Nts=100、時間刻み幅粗視化率 Rtfc=10、時間積分法 Fine/Coarse solver/ Newmark-β 法、である。梁の振動問題は、物理条件は、片持ち梁の振動周期 T=17.66、先端に初期初期変位、数値解析条件は細かい時間刻み幅 δt=0.25、刻み数 2000 である。 時間並列計算条件は time slice 数 Nts=20、時間刻み幅粗視化率 $R^t{}_{fc}$=10 である。

それらの結果を、図 3 下段に示す。これらから、緩和の無い Parareal 法の場合（Parareal 法の更新の緩和係数 ɤ=1）は残差が急速に桁違いで増加するが、緩和型 Parareal 法では残差の上昇を抑制できていることが分かる。しかし、急速な残差の減少を実現するまでにはなっておらず課題は残る。課題はあるものの、他の結果情報も併せて評価すると、低並列（5～10）、緩い収束判定(10-2～-3)で加速率 2～3 は可能であり（PinT2017/津波、PinT2019/汎用流体解析コード EXN/Aero（米国）の例から推定）、すでに Parareal 法は汎用コードにも組み込まれている。したがって、

今後、急速に実用化が進むと推定する。以上のように、Parareal 法に基づく時間並列計算法の実問題への応用性を調べ、Phase field 法を対象に非線形収束制御法の効果を明らかにした。また、双曲型偏微分方程式の Navier-Stokes 方程式と波動方程式を対象に緩和型 Parareal 法の効果を評価し、それらの有効性を確認した。また、開発したフレームワークは、これらの成果を組み込んだチュートリアル形式で書籍とネット上においたプログラムとして、公開準備をしている。

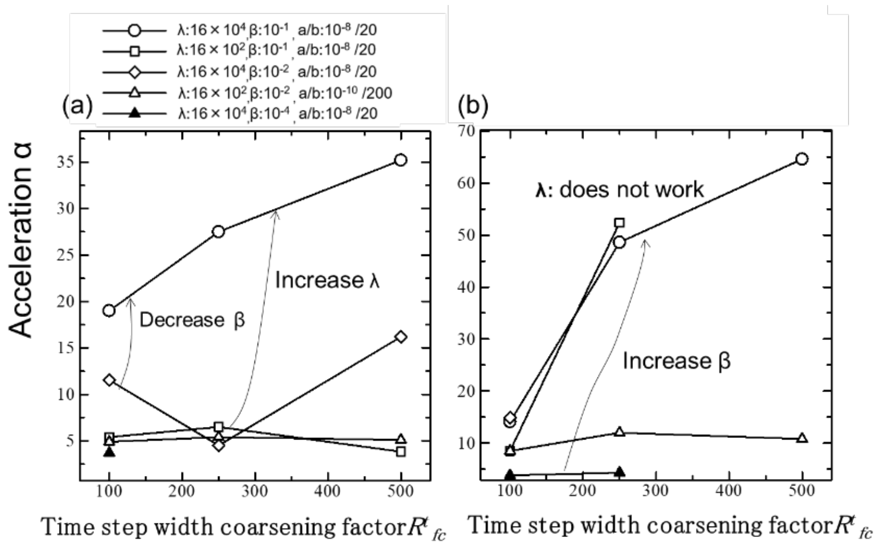

図 2　Allen-Chan 方程式の加速

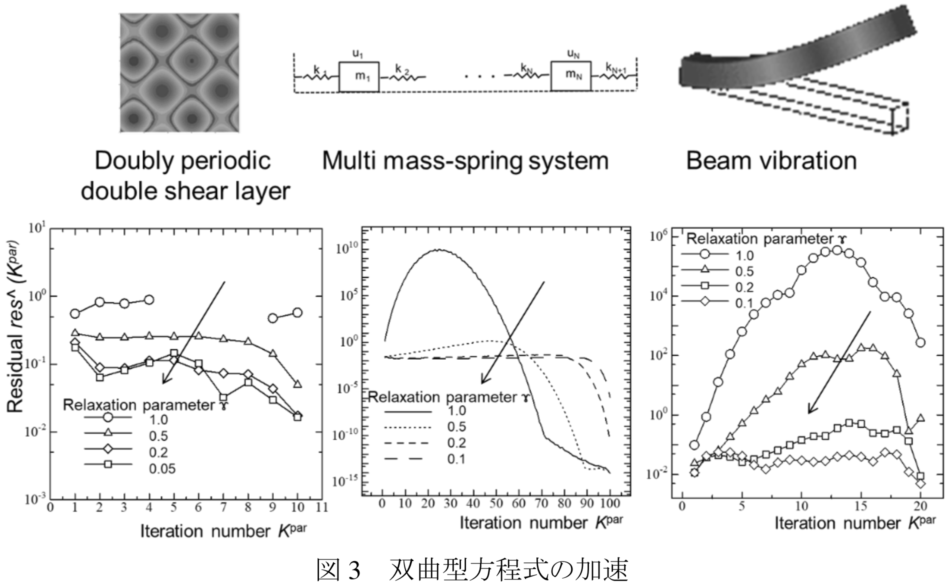

図 3　双曲型方程式の加速

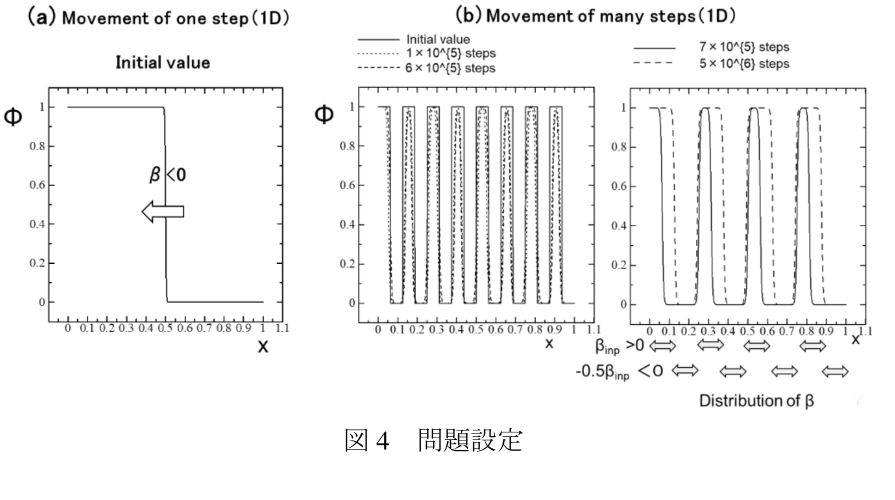

図 4　問題設定

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計2件（うち査読付論文　2件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名	４．巻
Mikio Iizuka, Kenji Ono	19
２．論文標題	**５．発行年**
Influence of the phase accuracy of the coarse solver calculation on the convergence of the parareal method iteration for hyperbolic PDEs	2018年
３．雑誌名	**６．最初と最後の頁**
Computing and Visualization in Science	97～108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	**査読の有無**
10.1007/s00791-018-0299-9	有
オープンアクセス	**国際共著**
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	－

１．著者名	４．巻
Mikio Iizuka and Kenji Ono	印刷中
２．論文標題	**５．発行年**
Influence of the phase accuracy of the coarse solver calculation on the convergence of the parareal method iteration for hyperbolic PDEs	2018年
３．雑誌名	**６．最初と最後の頁**
Computing and Visualization in Science	印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）	**査読の有無**
なし	有
オープンアクセス	**国際共著**
オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	－

〔学会発表〕　計13件（うち招待講演　3件／うち国際学会　9件）

１．発表者名
Mikio Iizuka, Kenji Ono
２．発表標題
Convergence Acceleration of the PinT Integration of 　Advection Equation using Accurate Phase Calculation Method
３．学会等名
SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing（国際学会）
４．発表年
2018年

１．発表者名
Mikio Iizuka, Kenji Ono
２．発表標題
One of challenges to parallelise the advection equation in time...,　can we?
３．学会等名
時間領域計算法のワークショップ（国際学会）
４．発表年
2018年

１．発表者名
Mikio Iizuka, Kenji Ono

２．発表標題
Investigation of Convergence of Parareal Method for Advection Equation using Accurate Phase Calculation Method

３．学会等名
7th Workshop on Parallel-in-Time methods（招待講演）（国際学会）

４．発表年
2018年

１．発表者名
飯塚 幹夫，小野 謙二

２．発表標題
時間並列計算法の最新研究成果と将来展望

３．学会等名
第23回計算工学講演会

４．発表年
2018年

１．発表者名
飯塚 幹夫，小野 謙二

２．発表標題
移流問題に対する Parareal法による時間並列計算の収束挙動

３．学会等名
第32回数値流体力学シンポジウム

４．発表年
2018年

１．発表者名
飯塚 幹夫、今村 成吾、小野 謙二、横川 三津夫

２．発表標題
大規模時空間並列計算でのParareal法の性能評価

３．学会等名
第22回計算工学講演会

４．発表年
2017年

1．発表者名
飯塚 幹夫、小野 謙二

2．発表標題
フェーズフィールド法に対するParareal法による時間並列計算の収束挙動

3．学会等名
第31回数値流体力学シンポジウム

4．発表年
2017年

1．発表者名
Mikio Iizuka and Kenji Ono

2．発表標題
Convergence Acceleration of the PinT Integration of Advection Equation using Accurate Phase Calculation Method

3．学会等名
SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018（国際学会）

4．発表年
2018年

1．発表者名
Mikio Iizuka and Kenji Ono

2．発表標題
One of challenges to parallelise the advection equation in time..., can we?

3．学会等名
Workshop on Parallel-in-Time method for various fields（国際学会）

4．発表年
2018年

1．発表者名
Mikio Iizuka and Kenji Ono

2．発表標題
Investigation of Convergence Characteristics of Parareal Method for Advection Equation using Accurate Phase Calculation Method

3．学会等名
6th Workshop on Parallel-in-Time methods（招待講演）（国際学会）

4．発表年
2017年

〔その他〕

1．発表者名 Toshiya Takami
2．発表標題 PinT Computation of Swarm Behavior
3．学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018（国際学会）
4．発表年 2018年

1．発表者名 Tagami D. and Sugimoto S.-I.
2．発表標題 A reduced iterative domain decomposition method for mixed variational formulations derived from magnetic field problems
3．学会等名 SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing 2018（国際学会）
4．発表年 2018年

1．発表者名 Mikio Iizuka and Kenji Ono
2．発表標題 Investigation of Convergence Characteristics of the Parareal method for Hyperbolic PDEs using the Reduced Basis Methods
3．学会等名 Fifth Parallel-in-time Integration Workshop.（招待講演）（国際学会）
4．発表年 2017年

〔図書〕　計1件

1．著者名 飯塚幹夫、小野謙二	4．発行年 2020年
2．出版社 森北出版	5．総ページ数 263
3．書名 時間並列計算法入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

－

６．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究分担者	高見　利也 (TAKAMI TOSHIYA) (10270472)	大分大学・理工学部・教授 (17501)	
研究分担者	田上　大助 (TAGAMI DAISUKE) (40315122)	九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・准教授 (17102)	
研究分担者	大島　聡史 (OOSHIMA SATOSHI) (40570081)	九州大学・情報基盤研究開発センター・助教 (17102)	2019年に名古屋大学へ異動