OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	A Study on Effective Generation and Solution of Matrices in the Process of Numerical Simulation
Author(s)	佐川, 暢俊
Citation	大阪大学, 2015, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/52023
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 （ 佐川暢俊 ）	
論文題名	A Study on Effective Generation and Solution of Matrices in the Process of Numerical Simulation （数値シミュレーションにおける行列生成と解法の高効率化に関する研究）

論文内容の要旨

計算機の処理能力の高まりと工業分野での利用の進展に伴い、物理現象を計算機によって再現する数値シミュレーションの重要性が高まりつつある。数値シミュレーションは、(1)計算の対象となる空間に多数の節点を配置し、節点間での物理変数の関係を表現する連立一次方程式（すなわち係数行列）を組み立てる行列生成フェーズ、(2)生成された行列を直接法、反復法などの線形計算により解く行列解法フェーズ、の2つから成るのが一般的である。本研究では、これら2つのフェーズを高効率化することにより、数値シミュレーションの全体の効率を向上することを目的とする。

行列生成フェーズにおいては、解くべき物理問題の性質やその離散化方式の違いのために行列生成の方法は千差万別であり、したがって行列を生成するための計算機プログラムは問題個別に開発しなくてはならないことが本質的な課題であった。本研究では、この課題に対処するために、対象となる物理問題をそれを支配する偏微分方程式のレベルで記述可能とする専用言語を提案し、その記述をスーパーコンピューターに適した計算機プログラムに自動翻訳するトランスレータを開発した。本システムにより利用者は、多様な物理問題や解法アルゴリズムを簡潔に表現できるのみならず、その記述を高効率に行列を生成する計算機プログラムに自動的に変換可能となる。本システムを伝熱、移流拡散、電磁気、流体力学などの物理問題と、陰解法、Crank-Nicholson法、SMAC法などの解法アルゴリズムに適用し、多様な問題が従来比1/10以下の行数で記述できること、そこから自動変換される行列生成プログラムは90%以上のベクトル化率を持つことを確認した。

行列解法フェーズに対しては、従来から多くの解法が提案されているものの、クラウドやマルチコアなど最新の豊富な計算機環境が効率よく利用できていないことが課題であった。これに対し本研究では、大規模行列解法として広く用いらる反復解法のGMRES(m)法をベースとし、これに高い並列性を持つことで知られる遺伝的アルゴリズム(GA)を組み合わせるアプローチ(GA-GMRES(m)法)を提案した。本方法では、ランダムに生成した複数の初期値を遺伝子とみなして反復を開始するとともに、反復計算が途中で停滞した場合には、複数の中間解を交配させて次世代の遺伝子を生成し、これを新たな初期値として計算を続行する。交配のアルゴリズムとしては、１点交差法、単純平均法、突然変異法、加重平均法を比較する数値実験を行い、加重平均法が特に効果的であることを見出した。複数の行列に対して加重平均法を適用したGA-GMRES(m)法の効果を条件を変えながら調べ、高々４個から８個の遺伝子を用いるだけで、従来のGMRES(m)法に対して実行性能が2倍から6倍に向上できることを確認した。さらに、GA-GMRES(m)法の収束進行状況を詳細に調べ、本方式の収束が停滞する場合には、全遺伝子に対する残差がほぼ等しくなることを見出した。この条件を「遺伝子横断型停滞(Chromosome-wide Stagnation)」と名づけ、通常は利用者が固定値として与えるチューニングパラメタmの値を停滞状況に合わせて動的に変更する方法を提唱した。複数の行列に対して本方式を適用し、利用者の介入なしに収束性能をさらに30%程度向上させ得ることを確認した。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　　佐川　暢俊　　）	
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主査　教授	薦田　憲久
	副査　教授	鬼塚　真
	副査　教授	下條　真司
	副査　教授	西尾　章治郎
	副査　教授	藤原　融

論文審査の結果の要旨

計算機の処理能力の急速な向上により、物理現象を計算機上で再現する数値シミュレーションの扱う対象や複雑度が増大し、解くべき係数行列は大規模悪条件化しつつある。本論文は、大規模シミュレーションプロセス全体の高効率化を実現するために、(1)高レベルな物理問題記述からの係数行列生成方式、(2)並列計算機環境に好適な係数行列演算の収束性向上方式、(3)係数行列演算の収束滞留を解消するための最適化方式についての研究成果をまとめたものである。その主要な成果を要約すると次の通りである。

(1)係数行列を広範囲な物理問題に対して効率的に生成するために、対象となる物理問題を偏微分方程式のレベルで記述可能とする専用言語、およびその記述をスーパーコンピューターに適した計算機プログラムに自動翻訳する処理系を提案している。処理系では、与えられた偏微分法定期式を有限差分法または有限要素法の離散化ルールに基づいて数式処理し、得られた離散化方程式を評価するための計算機プログラムを生成している。本システムを移流拡散、電磁気、流体力学などの物理問題と、陰解法、Crank-Nicholson法、SMAC法などの解法アルゴリズムに適用し、多様な問題が従来比1/10以下の行数で記述できること、そこから自動変換される行列生成プログラムは90%以上のベクトル化率を持つことを確認している。

(2)係数行列演算をクラウドやマルチコアなどの並列計算機環境下で効率よく実行するために、大規模行列解法として広く用いられるGMRES(m)法と高い並列性を持つことで知られる遺伝的アルゴリズム(GA)とを組み合わせるGA-GMRES(m)法を提案している。GA適用にあたっては、ランダムに生成した複数の初期値を遺伝子とみなして反復計算を開始し、計算が停滞した場合には新に開発した「加重平均法」を用いて複数の中間解を交配することにより次世代遺伝子を生成している。複数の行列に対しGA-GMRES(m)法を適用し、高々４個から８個の遺伝子を用いるだけで、従来のGMRES(m)法に対して実行性能が2倍から6倍に向上することを確認している。

(3)GA-GMRES(m)法の収束性をさらに高めるために、収束が停滞する場合にはチューニングパラメタmの値を変更することで収束状況を改善する方法を提案している。収束性が悪化している状態では全遺伝子に亘って残差がほぼ等しくなるという「遺伝子横断型停滞」条件を見出し、本条件下でのみmの値を段階的に増大させ、条件緩和時には復帰させている。複数の行列に対して本方式を適用し、利用者の介入なしに収束性能をさらに30%程度向上させ得ること、従来のmの自動最適化手法に対しても20％程度の性能優位性を有することを確認している。

以上のように，本論文は数値シミュレーションにおける係数行列生成と解法の効率化に関する研究として、情報科学に寄与するところが大きい。よって、博士（情報科学）の学位論文として価値あるものと認める。