

# 超ロバスト計算原理プロジェクト

杉原厚吉

## 1 はじめに

本プロジェクトは、情報の処理と利用を支える諸計算を外乱に対してロバストなものにするための技術を、分野横断的な原理の形に体系化し、それを実世界情報処理に役立てることをめざしている。ここでカバーする計算は、通常の意味での数値計算や記号計算だけでなく、符号・暗号計算、幾何計算、プログラム計算、確率計算、統計計算、離散計算、制御計算、並列計算などの広い範囲を含み、さらに、新しい計算原理として期待されている量子計算や分子計算も視野に入れている。

本プロジェクトに参加している研究者は、既にそれぞれの分野でロバスト計算技術を開拓してきているが、本プロジェクトでは、それらを横断的に眺めて体系化し、汎用のロバスト計算原理を確立しようとしている。本年度は、そのための組織作りとインフラ整備を行うと同時に、計算原理の確立の方針作りの議論を深めてきた。以下では、それらの成果をまとめる。

## 2 プロジェクト組織

本プロジェクトは、次の四つの活動グループから成り、それぞれの活動グループはさらに複数のサブプロジェクトに分かれている。

### (A) 活動グループ A: アルゴリズム

各種のアルゴリズムのためのロバスト計算技術の確立をめざし、次の四つのサブプロジェクトから構成されている。

- (A1) 超ロバスト並列計算
- (A2) ロバストソフトウェア構成法
- (A3) 符号化におけるロバスト計算

### (A4) 超ロバスト幾何計算

### (B) 活動グループ B: 不確実性のモデル化

確率的現象の背景に存在する不確実性の適切なモデル化によって、ロバストな確率的計算技術を開発することをめざしている。次の二つのサブプロジェクトから成る。

#### (B1) 不確実性のモデル化と予測

#### (B2) 揺動散逸原理に基づく時系列データの非線形構造の解析と超ロバストなモデル化

### (C) 活動グループ C: 最適化 / 制御

最適化と制御、ハイブリッドとデュアル、離散と連続の融合の観点から最適化計算・制御計算のロバスト化をめざしており、次の二つのサブプロジェクトから成る。

#### (C1) ロバスト最適化

#### (C2) 適応/学習システムにおける最適化と計算手法

### (D) 活動グループ D: 量子計算・分子計算

現在のフォンノイマン型計算機では越えられない計算量の壁を打ち破ることが期待されている新しい計算原理に対しても、そのロバスト性確保の技術を開発しており、次の二つのサブプロジェクトから成る。

#### (D1) 超ロバスト量子計算

#### (D2) 超ロバスト分子計算

### 3 プロジェクトのめざすもの

すべての情報処理は、計算に支えられている。しかし、情報化社会の変化が激しいために、情報処理を支える計算の整備がそれに追いつけないでいる。その結果、使っていると途中でフリーズしてしまって動かなくなるソフトウェアが世の中に溢れ、深刻な状態に陥りつつある。

本プロジェクトでは、このような現状を反省し、外乱があっても安定して動作するロバストな計算技術を、さまざまな分野に通用する汎用的・横断的な原理として確立し、それを実世界での情報処理に役立てることを目的としている。ここで対象とするのは広い意味での計算である。情報処理の基本となる数値計算・記号計算だけでなく、確率統計計算、プログラム計算、符号暗号計算、図形計算、離散計算、並列計算なども含み、さらに、新しい計算原理として今後の発展が期待されている量子計算、分子計算なども視野に入れている。

実世界での計算は、さまざまな外乱にさらされている。たとえば、数値をデジタル化するときの数値誤差、データ収集の際の測定誤差、計算素子や通信路がもたらす物理雑音、ソフトウェア作成などにおける人的ミス、確率的現象が本質的にもつ不確定性などがある。人が悪意をもって計算を妨害しようとするのも、さらに深刻な外乱である。

一方、問題を解くための計算理論は、基本的には外乱のない世界を仮定して、その中で作られている。しかし、そのような無菌理論は、黴菌だらけの現実世界では無力である。これが、計算の不安定性の主な原因であり、動作の不安定なソフトウェアが世の中に氾濫する理由である。

この問題を克服するためには、外乱という黴菌に対して抵抗力をもった計算法が必要である。それが、ロバスト計算とよばれる技術である。

本プロジェクトの参加者は、今まで個別の計算と個別の外乱に対してロバスト性を確保するための技術を開発し、蓄積してきている。本プロジェクトでは、それらを横断的に体系化するとともに、総合的に活用して、多様な雑菌のいずれに対しても抵抗力をもった計算法の確立をめざしている。これが、単なるロバスト計算ではなく、「超」ロバ

スト計算とよぶ理由である。

ソフトウェア制作技術者は、今までは、無菌理論が提供する計算法を、抵抗力をもった計算法に書き換えるという作業を自ら行わなければならなかった。しかし、これは困難な作業で、完全な解決は難しく、締切りに追われて不完全なままのソフトウェアを世に出していた。

超ロバスト計算原理の確立によって、世の中は次のように変わるであろう。超ロバスト計算原理に基づいた計算法は、黴菌に対する抵抗力をすでに持っているため、そのままコンピュータ言語に翻訳するだけで、安定な動作が保証されている。したがって、ソフトウェア制作技術者の負担が減り、ソフトウェアの生産性が向上する。さらに、それを使うユーザに対しても、今までとは違ってフリーズしない快適な計算環境を提供できるようになる。

このような情報化社会の姿を実現するために必要なロバスト計算原理の確立が、本プロジェクトのめざすものである。

### 4 ロバスト計算原理確立の基本方針

本プロジェクトに参加するそれぞれの研究者がこれまでに開発してきたロバスト計算技術を、分野横断的な汎用技術として体系化するために、次の三つの基本方針を立てた。

(1) 対象の構造一貫性に基づくロバスト計算原理  
多くの計算分野でのロバスト性確保の方針には、一つの共通性がある。それは、計算対象が本来もっている基本的性質や法則を計算の中でも忠実に保持しようとするものである。その具体例には、次のようなものがある。

(a) 物理不変量の保持: 物理現象をシミュレートするための偏微分方程式においては、対象とする物理現象が、もともといくつかの不変量をもっていることが多い。たとえば、エネルギー保存の法則、運動量保存の法則などの法則に従う不変量である。これらの物理不変量は、正しく偏微分方程

式をたてた段階では自動的に保持されているが、それを離散化した差分方程式においては必ずしも保持されるとは限らない。ここで、物理不変量を保持するように差分化を行うと、ロバスト性の高い数値解法が得られることが多い。

(b) 非可逆性の保持：物理法則の中には、エントロピー増大の法則のように、時間とともに一方へ変化するが、逆方向へは変化できない量がある。これも、偏微分方程式を離散化すると、必ずしも満たされるとは限らない。この法則が満たされるように離散化の方法を選ぶことによって、たとえば制御の方法などをロバストにすることができる。

(c) 位相不変性の保持：幾何計算においては、対象となる幾何構造の背景に位相構造が存在する。この位相構造は、数値誤差の影響を受けることなく、論理計算のみによって厳密に計算できる。そこで、対象がもつべき位相構造の保持を数値計算結果より優先させることによって、幾何計算をロバストなものにすることができる。

(d) 公理系の保持：与えられた問題を解くためのプログラムの正しさを保証するためには、プログラムのそれぞれの段階でデータが満たすべき性質が実際に満たされることを確認する方法が有効である。そのためには、解が満たすべき性質を公理系の形で表現し、それがプログラムの処理に従ってどのように変化するかを調べればよい。このように公理系が満たされていることを確認することによって、プログラムの正しさを検証でき、ロバストなプログラミングができる。

以上のように、計算対象がもつ何らかの不変的構造に着目し、それが保持されるように計算法を構成することによって、ロバスト性の高い手法を作ることができる場面が多い。このことに着目し、分野横断的なロバスト計算原理の体系を作ることができるであろう。これが、構造の一貫性に基づく超ロバスト計算原理の構想である。

(2) 不確実性のモデル化によるロバスト計算原理  
確率現象に関する推定・検定・予測などを行うためには、一般に、確定的振舞いとランダム性をもつ外乱とが合成されたものとして現象を把握しようとする。このとき、何を確定的なものとし、何を外乱とみなすかには、一般には任意性がある。しかし、従来の多くの手法は、何が確定的で何が外乱かは自明に与えられたものとして出発して作られている。しかし、それでは、必ずしも適切なモデル化ができるとは限らず、計算が安定しない。

このような確率計算をロバストなものにするためには、確定的部分と外乱との切り分けを天降り式に与えるのではなくて、実際の対象やデータに即して注意深く行わなければならない。本プロジェクトでめざす超ロバスト計算原理の第二のものは、この点に着目して開発する予定である。

これによってたとえば、確率現象が定常性をもつことをあらかじめ仮定することすらやめて、定常か否かの判定も含めた対象のモデル化の方式を構成できるようになるであろう。このような構想のもとに、超ロバスト計算原理を探っていきたい。

(3) 構成要素のアモルファス結合によるロバスト計算原理

現実の世界は外乱に満ちている。計算誤差、測定誤差、物理雑音、人的ミス、確率的不確実性などがその代表例である。したがって、計算システムを構成する個々の構成要素を、外乱の影響を全く受けない完璧なものに仕上げることは難しい。このような状況で、システム全体のロバスト性を確保するためには、構成要素が不完全であっても、それらが補い合って全体としては正常に動くシステムを作る技術が必要である。

そのためには、構成要素の結合法自体も、完璧なプロトコルに基づいて誤りなく動作する方法をめざすだけでは限界がある。逆に、開き直って、外乱の影響を受けながらも機能する結合法を開発しなければならない。このような結合パラダイムをアモルファス結合と名付けて追求する。これが、本ロバストがめざす第三の超ロバスト原理の

構想である。

この構想は、並列結合・並列計算という既存技術のロバスト性確保のために重要であるのみでなく、現在の計算法の限界を打ち破るものとして期待の高い量子計算やバイオ計算のためにも重要である。量子状態は、本来確率的なものであり、その観測は不確定性の原理から逃れることはできない。DNA 計算や分子計算などの生体现象を利用した計算においても、個々の DNA や分子などの構成要素の不確定性は高い。これらの構成要素を組み合わせ、全体としてロバストな計算システムを構成するための設計原理として、アモルファス結合によるロバスト計算原理を体系化していきたい。

## 5 ミュージアムと融合研究

本プロジェクトでは、体系化した超ロバスト計算原理を実世界の情報処理へ応用することも目標の一つに掲げている。このような応用を通して、他分野の情報技術との融合を図るためには、本プロジェクトの基本的な考え方を他分野の研究者にもわかってもらうことが大切である。しかし、計算をテーマとする研究の内容は、中身が表に形として現れないために、一般にわかり難いという宿命をもっている。

そこで、本プロジェクトで開発する計算原理を、分野外の人にも分かってもらえるようにわかりやすく発信するために、超ロバスト計算原理ミュージアムの開設を予定している。本年度は、そのためのインフラストラクチャーの整備を行った。具体的には、約 60 平方メートルのスペースを確保し、そこに大画面ディスプレイ、展示パネルなどを備えた。これらを利用して、本プロジェクトで開発していく超ロバスト計算原理の分かりやすい展示や啓蒙を推進していきたい。

さらに、他分野との融合をめざして、問題発掘セミナーも開発している。これは、研究成果の発表ではなくて、計算を利用する諸分野の人を招いて、現在、研究の上で困難にぶつかっている計算的課題について話してもらおうものである。このよ

うな機会を通して、他分野との融合のための接点を増やしていく。

## 6 その他

本プロジェクトでは、本年度に約 2,800 万円の予算を使い、次のような規模で活動を行った。

### プロジェクト参加者

教授	11 名
助教授	6 名
講師	2 名
助手	10 名
事務補佐員	2 名
リサーチアシスタント	12 名
国際シンポジウム (ロバスト最適化分野)	1 回
国際ワークショップ (ロバストソフトウェア構成分野)	1 回
超ロバストセミナー	7 回
超ロバストテクニカルレポート	11 編

これらの活動の詳細については、以下のサブプロジェクトの成果報告の項を参照されたい。