

# まえがき

単一の計算機上である問題を効率よく解決するための方法を記述したものが逐次アルゴリズムである。一方、相互結合された多数の計算機から構成される分散システム上である問題を効率よく解決するための方法を記述したものが分散アルゴリズムであって、分散システムに属する各計算機上で動作する（通信命令を含む）逐次アルゴリズムの集合である。並列アルゴリズムは分散アルゴリズムとほとんど同じように定義される。しかし、並列アルゴリズム（および逐次アルゴリズム）と分散アルゴリズムはその対象に明確な相違がある。

逐次アルゴリズムや並列アルゴリズムが対象とする問題（のインスタンス）はそのアルゴリズムを実行する計算システムと直接にかかわりがない。すなわち、これらのアルゴリズムを実行する計算システムはインスタンスにとって純粹な解決機械である。それに対して、分散アルゴリズムが対象とする多くの分散問題では、（多少の誇張を許すと）分散アルゴリズムを実行する分散システム自体が問題のインスタンスである。すなわち、分散アルゴリズムはそれを実行している分散システムを制御するためのアルゴリズムであり、制御に必要なさまざまなもの問題を解決するためにその分散システム上で実行される。

具体的に説明する。与えられた数のリスト  $L$  から最大値を求める最大値問題を考える。逐次アルゴリズムや並列アルゴリズムでは、インスタンス  $L$  が目の前に与えられて、その最大値をある計算システムを用いて計算する。一方、分散問題としての最大値問題（最大値発見問題と呼ばれている）ではインスタンスである  $L$  の各要素は最大値発見アルゴリズムが実行されている分散システムの各計算機の局所変数に維持されている。すなわち、 $L$  は最初から分散システムの中に分散されていて、 $L$  全体を知るものはいない。たとえば、分散システムに属する各計算機間の負荷分散問題を考える。負荷最大の計算機を発見するために最大値（負荷）発見問題を解決する必要が生じるかもしれない。この場

合には、各計算機の現在の負荷が局所変数に維持されていて、 $L$  の要素となる。もちろん、負荷分散の難しさの大半は刻々と変化する  $L$  の現在の状態を正しく知ることの困難さにある。

通信遅延が無視できるならば、各計算機上に分散されているインスタンスの断片をある計算機上に（一瞬のうちに）集めて完全なインスタンスを構成し、逐次アルゴリズムを用いてこのインスタンスを解くという自明な分散アルゴリズムが、最大値発見問題を含む多くの分散問題に対して構成できる。しかし、通信遅延は計算速度の比ではなく、無視できないという現実があり、これが分散アルゴリズムの設計に現れる困難さの最大の原因である。

多くの分散アルゴリズムは制御アルゴリズムであると上で述べた。自律的に（すなわち、分散アルゴリズムの実行とは独立に）状態が変化するシステムを正しく制御するためにはシステム全体の現状を正確に把握する必要がある。しかし、通信遅延が存在するときには、一般に、各計算機上のアルゴリズムが理解する「システム全体の現状」に一貫性を与えることが困難（あるいは不可能）である。すなわち、上で「ある計算機上でインスタンスを構成し、逐次アルゴリズムを用いて解決する」と言ったが、インスタンスを正確に構成することが困難（あるいは不可能）となる。通信遅延モデル（すなわち想定できる通信遅延）に依存して、各計算機が獲得できるインスタンスに関する情報の質と量が決まり、それによって分散アルゴリズムの有無と達成できる性能が定まる。

分散アルゴリズムの設計に現れる困難さの第2の原因是分散システムは故障を免れないという現実である。逐次アルゴリズムや並列アルゴリズムにおいても利用する計算システムの故障は極めて重大な問題である。しかし、別の計算システムで再計算を行うという単純な解決法がある。少なくとも、故障した計算機システムの回復とそれに伴うアルゴリズムの回復は、これらのアルゴリズムの責任ではない。一方、分散アルゴリズムは制御アルゴリズムであるから、故障に耐えて分散システムの制御を行えることが分散アルゴリズムに対する重要な要請である。実現できる耐故障性は、各計算機が獲得できるインスタンス情報の質と量に依存していて、したがって、通信遅延モデルと強い関係がある。

分散アルゴリズムが基本的に持つと期待されている性質として、インスタンスの自律的変化に対する追従性とシステム故障に対する耐性であることを説明

した。しかし、多くの場合に、分散アルゴリズムにとって、（ある種の）インスタンスの自律的変化は（それに対応するある種の）システム故障と区別できないし、また、区別する必要がない。たとえば、アドホックネットワークのように、計算機システムに参加する計算機が動的に変化するようなシステムにおいては、ある計算機が突如としてシステムから離脱する可能性がある。そこで、このようなシステム上で正しく動作する分散アルゴリズムの多くが計算機の停止故障に対する耐性を自然に備えていることは想像に難くない。すなわち、分散システムの自律的あるいは他律的な要因による変化に適応できることが分散アルゴリズムに求められている基本的な性質である。本書が、基本的には耐故障分散アルゴリズムを説明することを目的としているにもかかわらず、「適応的分散アルゴリズム」というタイトルを持つのはこの理由からである。

本書は増澤と山下の共著である。しかし、大阪大学の角川裕次准教授にもお願いをし、著者の二名を含む三名で全体の校正に当たった。お気づきのように山下は本シリーズの編集委員を勤めている。当然、本シリーズの早期の完結のために早々の脱稿を期待されていたのであるが、生来の怠慢癖で皆様にご迷惑をおかけした。特に、元共立出版の小山透氏と共立出版の横田穂波氏の粘り強い励ましがなければ原稿は未だに宙に浮いていたに違いない。また、シリーズ編集委員である明治大学の杉原厚吉教授、東京大学の室田一雄教授、東京工業大学の渡辺治教授には査読をしていただき、貴重なご意見を賜った。これらの方々に対して改めてお礼を申し上げる。

2010年5月

増澤利光、山下雅史