

## 高エネルギー物理学研究での計算機システム

居 波 賢 二

はじめに

我々の研究グループ（高エネルギー物理学研究室）では、物質の究極の構成要素である素粒子と、その世界を支配する自然法則を実験的に探究している。その実験現場では、高速ネットワークで繋がったコンピュータを大規模に用いた研究を続けているので、本稿では、高エネルギー物理学実験研究におけるコンピュータ・ネットワーク資源の利用状況について紹介する。

高エネルギー物理学実験とは

高エネルギー物理学研究では、物質を構成している最も小さい基本的な粒子である素粒子の探索と、その素粒子同士が及ぼす反応の研究を行ない、普遍的な自然物理法則の解明を目指す。物質を構成している原子・分子より細かな構造を見るためには、エネルギーを与えて分解する必要がある。より小さい素粒子の研究を行なうには、より高いエネルギーを物質に与えて、瞬間的に起こる現象を分析することになる。

高エネルギー実験では、大きな加速器で光速近くまで加速した荷電粒子を物質と衝突させたりまたは反対向きに加速された荷電粒子同士を衝突させて高エネルギー状態を作り出し、そこで起こる反応や生成されたさまざまな粒子の崩壊の様子を、巨大な測定装置で精密に測定する。測定された膨大な実験データを、測定器の校正データ解析の後、起こった物理現象の立体再構成プログラムにかけ、測定した粒子のエネルギー、3次元運動量などの情報に変換する。この立体再構成した粒子の情報を用いて研究者は物理解析を行ない、自然現象の法則を研究する。

大規模な実験では国際共同実験として研究組織を作り、加速器・実験装置を設置する研究所が中央的な研究所として運営され、実験を実行する各研究機関が測定器各部の建設や運用、物理解析を担うスタイルで研究を進めている。

データ解析でのコンピュータ

測定は数 m から数 10m の大きさの顕微鏡を使って数ミクロン以下の現象を観測するようなスケールであり、精密な解析結果を得るためにはさまざまな用途を持った検出器群から構成される複雑な測定器全体の性能を良く理解する必要がある。そのため、測定データの精密な理解のためには、1) 測定器中で起こる崩壊で生成された粒子と測定器を構成する物資との反応の理解、測定器の形状・補正データの作成と、2) 測定データから理論的に期待される物理反応の再構成、3) 期待される反応が実験的にどのように見えるか、検出効率などの調査が必要である。これらのデー

タ処理のためにコンピュータの計算能力とデータ蓄積容量が必要となる。実験データの蓄積や事象の再構成のためのデータ処理は、主に中央の研究所のコンピュータ施設が行なう。各研究機関では、物理解析を実行するほかに、データ解析に必要なモンテカルロシミュレーションを分担して行っている。

モンテカルロシミュレーションでは、物理反応が測定器を通じてどのように見えるかを調べるために Geant と呼ばれる粒子と物質の反応シミュレーションを行なうライブラリを用いた測定器シミュレーションを行なう。物理反応を精度良くシミュレートするために多くの複雑な計算が必要となるが、その上、モンテカルロシミュレーションを実験データの統計量の数倍に相当する回数実行し、統計精度を上げる必要がある。このシミュレーションデータの生成を、本研究室を含む各研究機関が分担して実行しており、ネットワークでつながったこれらのコンピュータを、大きな分散計算機施設として運用している。モンテカルロシミュレーションのデータ再現性は、実験精度に直接影響を与えるものになりつつあり、シミュレーション実行のための計算機は実験施設に匹敵する。

#### 名古屋大学キャンパスでの計算機の運用

当研究室は現在、つくば市高エネルギー加速器研究機構（KEK）で行なわれている世界最高輝度実験である B ファクトリー実験において、物理解析と共に測定器の開発・運用とシミュレーションデータの生成などを行なっている。B ファクトリー実験は、10 カ国約 50 の研究機関からなる国際共同実験で、多数の研究者が研究しており、数多くの研究成果を出し続けている。当研究室での解析成果として、稀に起こると予言されていた  $B \rightarrow \tau \nu$  崩壊を世界で始めて測定した。また、当研究室が主導的な役割を担っているタウレプトンの研究において、レプトンの香りを破る崩壊の探索を世界最高感度で行ない、約  $10^{-7}$  の崩壊分岐比上限値まで探索を終了している。

B ファクトリーは、円周約 3km の KEKB 加速器と Belle 検出器からなり、電子と陽電子を加速・衝突させ、そこで起きた事象を精密に測定する。図 1 に B ファクトリー実験で運用してい

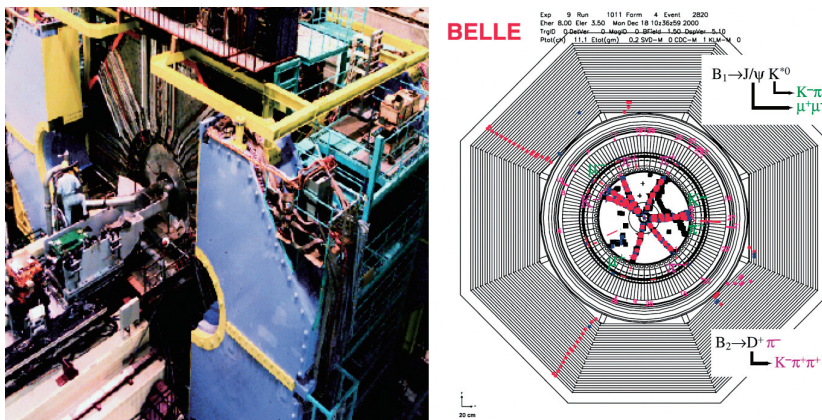


図 1 B ファクトリー実験で使用している Belle 検出器（左）と測定した事象の例（右）

る Belle 検出器と、測定された事象の例を載せる。実験は 24 時間稼動し、1 日で約 1TB の生データを蓄積する。蓄積した生データから、前述したように研究者が物理解析に使用するための立体再構成したデータを生成する。

世界最高輝度実験であるため、測定する実験データの量が膨大なものとなっており、解析に必要なデータ量も大規模になっている。当研究室では毎年数 10TB ものデータを KEK から転送し、データ解析を行なっている。図 2 に当研究室のシステム構成図を載せる。当研究室では、E メールや web などのインターネットと繋がる生活線のほかに、KEK のコンピュータシステムと直接通信できる専用線を利用しており、大規模なデータ転送を日常的に行っている。また、シミュレーションもデータの統計量に応じて大量に実行する必要があるため、安価なコンピュータを大量に購入し、研究員自らがインストール・メンテナンスを行っている。大容量データストレージも安価なものを購入することで、データ解析に必要な計算機資源を確保している。研究者が独自にメンテナンスするというスタイルは、安価にシステムを揃えるというだけでなく、効率的なコンピュータシステムの構築という研究テーマを生み出し、また教育の場をも提供する。このことは、高エネルギー物理学実験では利用する周辺技術も研究テーマとすることを示す例となっている。

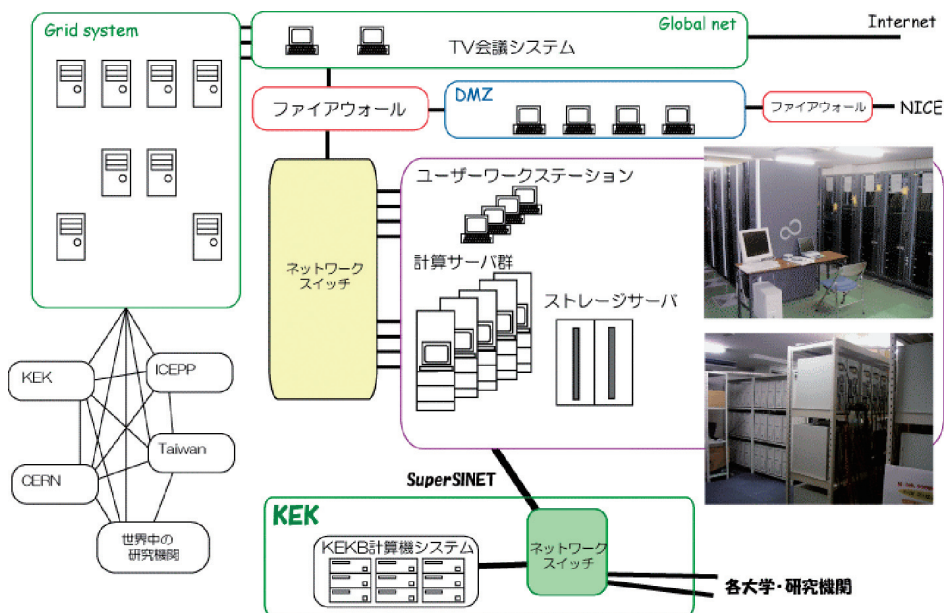


図 2 システム構成，ネットワーク図

また、当研究室は、2007 年から欧州 CERN 研究所で開始する LHC 実験において、そこで使用される ATLAS 検出器の建設を行なっている。LHC 実験では、世界最高エネルギー 14TeV の陽子-陽子衝突型加速器で生み出される事象を測定し、素粒子の標準理論において質量を生み出すという核を担いながらも未発見粒子であるヒッグス粒子の探索や、新現象の研究を行なう。LHC 実験では、図 3 に示す周長 27km の世界最大の加速器を用い、直径 25m 長さ 45m の ATLAS 検出器の他、2つの衝突点に置かれた検出器で測定を行なう。世界 35 カ国の研究機関が

ら 1800 人を越える研究者が研究を行なう過去最大規模の実験である。

生み出される実験データも今までにはない膨大なものとなる予定で、中央の CERN 研究所だけではデータ処理できない状況となる。そのため、各研究機関に設置されたコンピュータ資源をグリッド技術によって結び付け、あたかも 1 つの巨大な計算機として利用するシステムの構築を進めている。単一のグリッドシステムとして世界規模で実用化するものとしては世界初である。当研究室でも、図 2 にあるようにグリッドシステムを外部ネットワークに構築し、システム導入のテストや運用方法の確立を急いでいる。すでに、グリッドサイトとしての機能は実現できており、他サイトとの連携が取れて動作している。グリッドシステム自体は現在もパフォーマンス調整やデバッグ中であり、バージョンアップを繰り返し行なっている最中である。

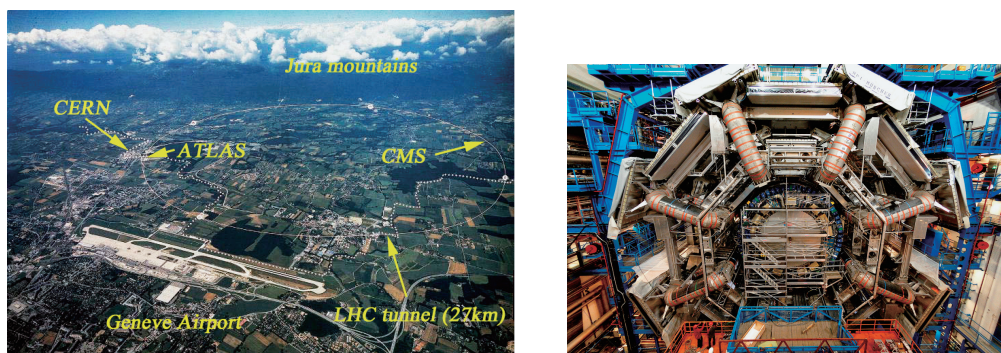


図 3 欧州 CERN 研究所の航空写真 (左) と建設中の ATLAS 検出器 (右)

## 研究の情報共有

今や欠かせないツールとなりつつある World Wide Web は、情報共有・論文参照ツールとして高エネルギー実験分野で生み出されたが、現在も重要な情報交換の手段として用いている。全世界の論文検索ページや、素粒子の性質・特性などをすべて網羅したデータベースの公開はもちろんのこと、日々のミーティングの記録、実験の運転状況の確認、実験装置の操作までできるようになっており、国際共同実験においてなくてはならないものである。

ほかに欠かせないものとして TV 会議システムがある。世界各国にある研究機関と共に実験の運転とデータ解析に関する打ち合わせ・議論を行なうため、IP ネットワークを使った TV 会議システムを古くから日常的に利用している。当研究室では現在、KEK で運転シフトを行なっているメンバーや、欧州 CERN 研究所で検出器を建設しているメンバーと、名古屋大学を繋いで連日打ち合わせに利用している。また、100 人以上の規模になるグループミーティングや研究会などにも利用しており、世界中の研究機関と多地点接続を行なっている。

## おわりに

以上、高エネルギー物理学実験の概要と、その研究の場で利用している計算機システムについて紹介した。計算機やネットワーク技術をフル活用することで、迅速に研究成果を挙げつづけることが可能となっている。高エネルギー実験自体が、かなり大規模になり世界で 1 つの実験場と

ということが主流となりつつある。そのため、世界中にあるコンピュータ資源をいかに効率よく統合し、分散処理システムとして構築していくかが今後の研究課題となっている。また、これらの分散システムや研究の情報共有手段は、インターネットを通じたネットワークに頼っているため、情報インフラとして常時接続できるネットワークの維持と品質の向上も欠かせないものとなっている。

(いなみ けんじ：名古屋大学大学院理学研究科)