

## 高エネルギー物理学における グリッド技術の応用

Application of Grid Technology to High Energy Physics

高エネルギー加速器研究機構<sup>☆1</sup> 計算科学センター  
渡瀬芳行 Yoshiyuki.Watase@kek.jp

高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター  
森田洋平 youhei.morita@kek.jp

高エネルギー物理学では加速器を用いた素粒子物理の実験を行うが、装置が巨大になることから、国際的に共同して実験装置を作り、大容量データを協調しながら解析する。このためこの分野では早くからネットワークの利用が発達し、国際的な分散型データ解析が進められてきた。グリッドはこのような世界規模のデータ解析環境を構築するための有望な技術として注目され、欧州 CERN を中心に進められている EU DataGrid プロジェクトや米国の GriPhyN や PPDG プロジェクトを中心として大規模なデータグリッド環境が整備されつつある。

ここでは高エネルギー物理実験の紹介を行うとともに、データの特徴、データ解析の手法等を捉えて、具体的にグリッドによって、グローバルな分散型データ解析をどのように行おうとしているかを述べる。

### 高エネルギー物理学とは

物質を細かく探究していくと、分子・原子のレベルから電子・原子核、陽子・中性子、さらにはクォークのレベルに到達する。現代の物理学では宇宙のすべての物質は6種類のクォークと6種類のレプトンからなり、それらの間に働く4つの相互作用（電磁力、弱い力、強い力、重力）を仲介する粒子として光子、W/Z ボソン、グルーオン、重力子が存在すると考えられている。このうち、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用に関してはゲージ理論が実験結果を精密に再現することが知られており、「標準理論」と呼ばれている。この標準理論の枠組みの中で現在唯一未発見の粒子としてヒッグス粒子がある。ヒッグス粒子は中間子やクォーク、レプトンに質量を与える粒子として存在することがゲージ理論により要請されているが、ヒッグス自身の質量は理論から予言することができない。過去の実験による探索や理論の適用限界から、陽子の質量の約千倍から1万倍<sup>☆2</sup>の範囲にあると予測されている。

ヒッグス粒子を観測し、その性質を詳細に調べることにより、クォークやレプトンはなぜ6種類存在するのか、なぜ物質に質量が存在するのか、などの根源的な問

いに答が見つかることが期待される。

高エネルギー物理学とは、陽子や電子などの粒子ビームを加速器で加速して、標的に照射したり、あるいはビーム同士を正面衝突させることで、そこで実際に起きる素粒子反応を測定し、粒子の相互作用などを調べる学問である。現在の主流であるシンクロトロン加速器では荷電粒子の軌道を電磁石により制御し、高周波によって繰り返し加速することでエネルギーと強度の高い粒子ビームを得ている。より高いエネルギー領域を調べるためには軌道半径の大きな加速器を用いる必要がある。表-1は現存するまたは計画中の、世界の主な加速器の一覧である。

### LHC 計画と ATLAS 実験

スイス・ジュネーブの郊外にある欧州核物理研究機構（CERN）では、表-1にあるように2007年の実験開始を目指して次世代の大型加速器 LHC（Large Hadron Collider）の建設を進めている<sup>1)</sup>。これは1988年から2000年まで行われた LEP（大型電子・陽電子衝突型）加速器のトンネルを利用して、世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器を作る計画である。図-1のよ

☆1 高エネルギー加速器研究機構（High Energy Accelerator Research Organization）：KEK

☆2 約 100GeV から 1TeV（1000 億～1 兆電子ボルト）



加速器	ビームの種類	重心系エネルギー	大きさ	研究所, 国	実験グループ	建設年
KEKB	電子・陽電子	8 GeV × 3.5 GeV	周長約 3 km	KEK, 日本	Belle	1999 年
PEP-II	電子・陽電子	9 GeV × 3.1 GeV	全長約 3 km	SLAC, 米国	Ba Bar	1998 年
Tevatron	陽子・反陽子	1.8 TeV	周長約 6 km	FNAL, 米国	CDF, D0	1985 年
LHC	陽子・陽子	14 TeV	周長約 27km	CERN, スイス	ATLAS, CMS, etc	建設中
リニア コライダー	電子・陽電子	500 GeV ~ 1 TeV	全長約 30km	未定		計画中

表-1 世界の主な加速器

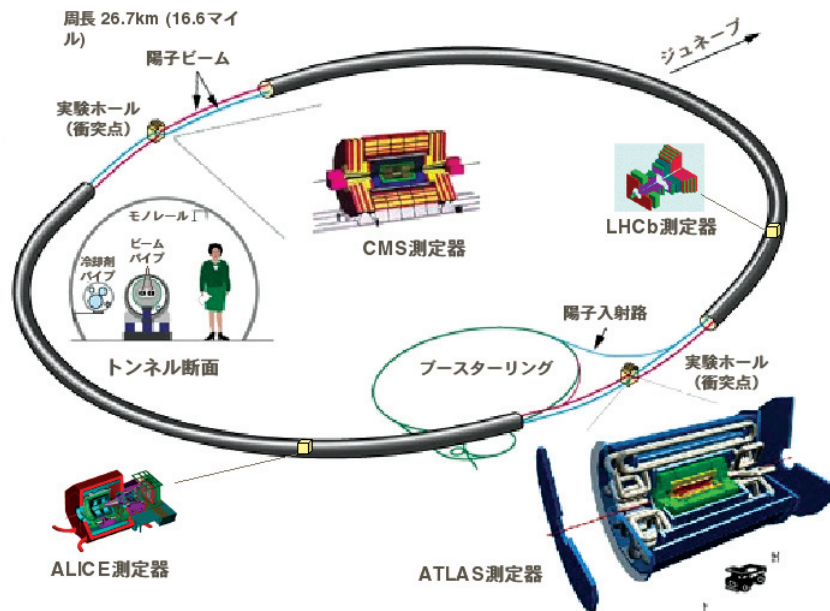


図-1 LHC 加速器と ATLAS, CMS, LHCb, ALICE の各測定器

うに、スイスとフランスの国境をまたぐ地下 100m、全周長 27km のトンネルに超伝導磁石を配置し、陽子を 7 兆電子ボルトまで加速する。加速された陽子はトンネルの 4 箇所を設置された衝突点で正面衝突し、さまざまな素粒子反応を起こす。この反応を観測するために、ATLAS, CMS, LHCb, ALICE という 4 つの実験グループがそれぞれ巨大な測定器を設置する。

このうち ATLAS 測定器は直径 22m、全長 40m、重さ 7,000 トンの精密なセンサと電磁石の集合体であり、荷電粒子の飛跡を検出するワイヤチェンバー、超伝導ソレノイド磁石、粒子のエネルギーを測定するカロリメータなどから構成される。測定器の各部分は国際協力で分担して建設され、33 カ国から 2,000 人近い研究者が参加している<sup>2)</sup>。

LHC 加速器の電磁石や ATLAS 測定器の構成要素

の建設には日本の大学や高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の研究者も参加して、ミューオン検出のためのワイヤチェンバーや、ソレノイド磁石、半導体飛跡検出器などの建設を担当している<sup>3)</sup>。

### 高エネルギー実験のデータ解析

LHC 加速器では 1 秒間におよそ 10 億回の陽子と陽子の衝突反応が起きる。そのうちの大部分は陽子を構成するクォークやグルーオンが「ソフト」な衝突を起こすことによる既知の素粒子反応であるが、一定の確率で「ハード」な衝突を起こし、我々にとって興味のある、高エネルギー領域の反応を観測することができる。このため、衝突事象 (event) の特徴をトリガと呼ばれる電子回路でリアルタイムに選別し、1 秒間に 100 回ほどの頻

度でハードな衝突事象を記録媒体に保存していく。

高エネルギー実験の測定器から出てくる衝突事象の生データは、測定器の信号読み出し回路の時間情報や電流・電圧などの情報をデジタル化したものである。ATLAS 実験の場合、1 回の衝突事象で数 MB 程度の生データが媒体に記録されることになる。

衝突事象の中にどのような物理現象がどれだけ含まれるかは、それぞれの物理現象の反応の起こりやすさ（反応断面積）によって異なる。もしヒッグス粒子が LHC 加速器で生成されるとすれば、ヒッグス粒子に特徴的な崩壊様式を観測できる頻度は年間数百回から数千回程度であると予測されている。媒体に記録される生データの事象数が年間約 10 億回、サイズにして数ペタバイトであるから、ヒッグス粒子の探索は「干し草の山の中から針を見つけ出すような」作業となる。

実験データの解析は、上で述べた測定器の各部分から読み出されたデジタル情報をまず時間や電圧などのアナログ情報に換算し、較正され、衝突反応で発生した粒子が通過した地点の空間座標をパターン認識することから始まる。磁場中を通過する荷電粒子はその運動量に応じて曲がった飛跡を描くので、その曲がり具合から運動量を測定することができる。また、カロリメータという測定器で求めたエネルギーなどと組み合わせることで、粒子の種類を識別することができる。

それぞれの粒子が識別され、エネルギーや運動量が求められると、次に、それぞれの衝突反応事象の粒子の力学的トポロジに応じてどのような物理反応により発生した事象であるかが統計的に分類される。たとえば、陽子に含まれるクォークやグルーオンが強い相互作用で反応した事象では、ジェットと呼ばれる特徴的な粒子の流れのまとまりが観測される。このジェットの角度分布やエネルギー分布を複数の事象を集めて統計的に検証することで、強い相互作用の詳細な性質を理論予測と比較することができる。

ヒッグス粒子の探索は、ヒッグス粒子に特有の崩壊様式、たとえばヒッグス粒子が 2 個の Z 中間子に崩壊し、それぞれがさらに 2 個ずつのミュオンに崩壊するような特徴的な反応様式などを測定することで行われる。

図-2 に、シミュレーションによる事象例を示した。

## 階層型データ解析モデル

実験データを解析する場合、最も CPU を必要とするのは、粒子の飛跡を再構成する部分であり、ATLAS 実験のデータの場合、1 事象あたり約 300 SPECint95<sup>☆3</sup>

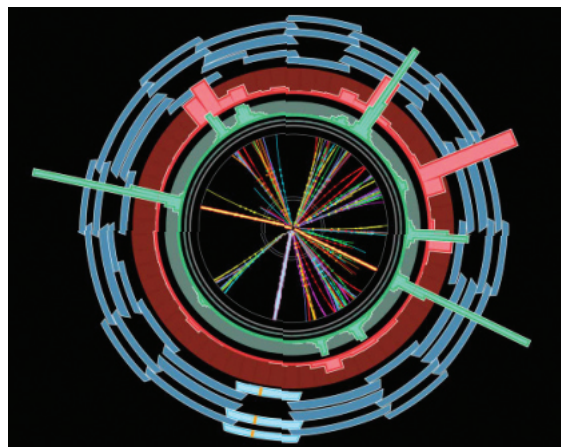


図-2 シミュレーションによる ATLAS 測定器での観測事象例

ビーム軸方向から見た事象例で、衝突点から飛散する粒子の飛跡は中央部の飛跡検出器により 3 次的に再構成され、その運動量が測定できる。外部の薄緑の棒の長さは電磁シャワーカロリメータで測定されたエネルギーの大きさを、ピンクの棒はハドロンシャワーカロリメータで測定されたエネルギーの大きさを表す。最外周にはミュオン飛跡検出器があり、透過力の強いミュオンの運動量を測定することができる。

秒の CPU サイクルが必要になると予測されている。事象再構成が ATLAS 測定器のデータ収集の速度に追い付くためには、約 20 万 SPECint95 の CPU を必要とする。

さらに、データ解析では、既知の物理反応（バックグラウンド）がどの程度、観測に影響を与えるかを調べるために、観測された事象の数倍以上のデータを標準理論からモンテカルロ計算によって生成し、測定器の反応をシミュレートする必要があり、上記の数倍から数十倍の CPU を必要とする。

高エネルギー実験のデータ解析は、そのデータ量が膨大であることが特徴である。それぞれの衝突反応事象は 1 事象ごとに独立に解析することができるので、データをそれぞれの CPU に送ってしまえばよく、計算ジョブの性質としてはきわめて並列性に富んでいる。解析の上流で行われるデータの較正や事象の再構成などは実験グループで統一的に行われるべき作業であるので、PC を数千台から数万台並べたファーム (PC Farm) を用いて「プロダクション」と呼ばれる解析ジョブで大量生産的に解析を進める。プロダクションを終えた事象データの中身は、反応で得られた粒子の運動量やエネルギーなどの物理量であり、事象サマリーデータ (Event Summary Data) と呼ばれる。これをさらにいくつかの典型的な物理反応事象の特徴に応じて事象全体のトポロジや観測された粒子の種類に分類して、それぞれの研究テーマに応じた事象データを絞り込んでいく。この段

<sup>☆3</sup> SPECint95: CPU の演算性能の評価単位。最近の PC は、数十 SPECint95 である。

## LHCの多階層型地域解析センターモデル

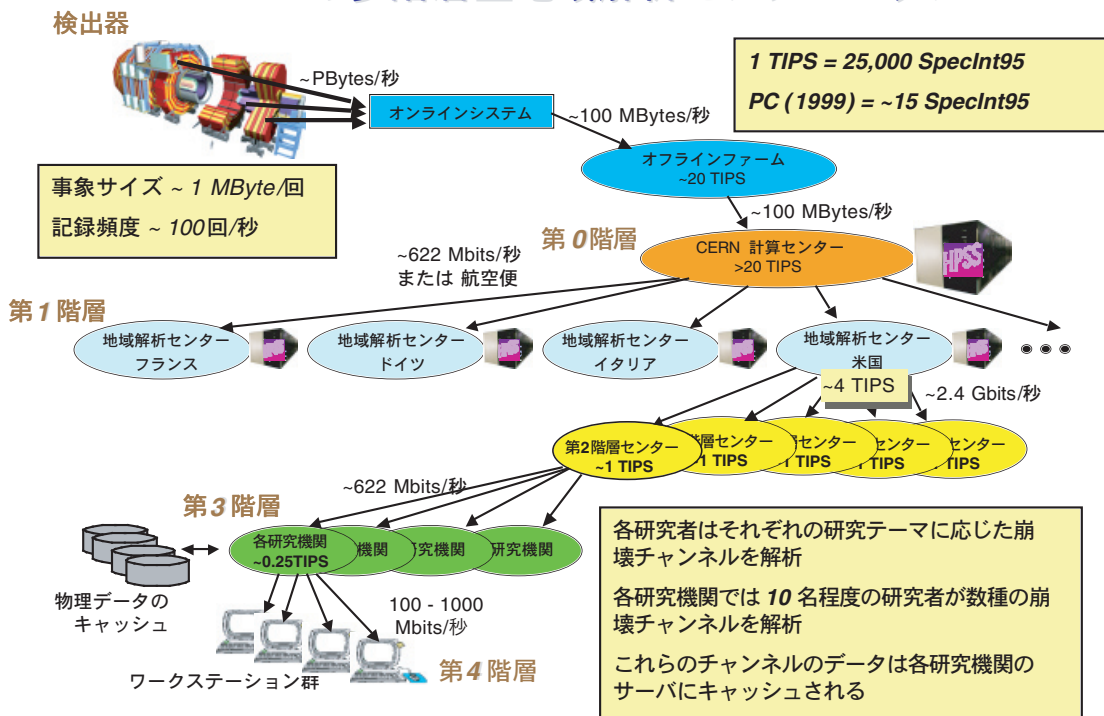


図-3 LHC計画の多階層型地域解析センターモデル (1999年)

階では事象あたりのデータ量をさらに絞り込んで、扱いやすいサイズのデータセットを生成する。この段階のデータを解析オブジェクトデータ (Analysis Object Data) と呼ぶ。

実験データのうち、生データは加速器を長期間運転して得られた貴重なもので、かつ、その総量も多いので、実験が行われている CERN にバックアップも含めて大切に保管される。生データを再構成して得られる事象サマリーデータは、データ量としてはやはり年間数ペタバイトに及ぶが、その後の解析の流れを決める重要なステップであるので第1階層とよばれる複数の地域解析センターにコピーが配られ、相互にアルゴリズムの検証などを行いながら解析が進んでいく。実際、実験中は飛跡再構成などのアルゴリズムが徐々に改良されていくので、年に数回の頻度で事象サマリーデータが再生成される。

解析の下流の解析オブジェクトデータは、事象あたりのデータサイズは数十KBから数百KB程度であるが、それぞれの物理の研究テーマに直結する最も重要なデータであり、テーマによって、数テラバイトから数十テラバイトに達する。このため実験が開始されると、それぞれの研究者は自分の研究機関が所有する計算機資源をフルに活用して、競ってそれぞれのテーマに沿った解析オブジェクトデータを、事象サマリーデータから生成する。ある解析オブジェクトデータの有効性が活発な議論を経て、実験グループの内部で認められるようになる

と、「グループの公式の解析オブジェクトデータ」として、世界各地の実験メンバに配られるようになる。また、理論と実験を比較するためのモンテカルロシミュレーションのデータも、それぞれの物理のテーマに応じて生成する必要があるが、参加メンバ各国でその生成作業を分担し、「グループ標準のモンテカルロデータ」として共有される。

これらの解析環境を支えるためには、2,000人に及ぶ共同研究者が日々生成する解析データのセットを、状況に応じて世界中に配ったり、相互にアクセスできる機能が重要となる。

ヒッグス粒子の探索などでは、ATLASグループ対CMSグループなどのライバル実験グループの間でどちらが先にヒッグスを見つけるか、という先陣争いのほかに、グループの内部で誰が最初に効率良く信頼性のある解析アルゴリズムを開発するか、という内部競争も熾烈になる。お互いに独立した解析を競争的に進めることで、相互確認にもなり、解析されたデータの信頼性が高まることになる。

このように協調的かつ競争的なデータ解析をサポートするためのデータ解析環境のモデルの検討が、LHC計画に参加する研究者の間で1998年頃から始まった。データの流れや必要な計算機資源、ネットワーク資源の配置などについてシミュレーションなどを行って検討した結果、図-3のような多階層型の地域解析センターモデル

ルが提唱されている<sup>4)</sup>。この背景には近年の国際ネットワークの急速な進展により、ペタバイト級の実験データを多国間で共有し、協調してデータ解析を行うことも夢ではなくなってきたことがある。そこで大学や研究所などの組織をまたがる分散型計算環境の構築のためにグリッド技術が重要になってくる。

## データグリッドに要請される機能

高エネルギー実験のデータ解析は、実験グループ単位で行われるため、データへのアクセスは、実験グループメンバのすべてに対して認められる必要がある。グリッド技術により、ユーザ認証を一度行うだけで、グループが所有する計算資源やデータを、その所在を気にすることなく透過的に利用できるというデータグリッド技術の理念には高い期待が寄せられている。

一方で、各国の高エネルギー関連の研究所では、LHC計画だけでなく、他の実験グループのデータ解析も行われている。したがって、これらの研究所の計算資源は、複数の実験グループが共有することになる。異なるグループ間ではお互いの実験データが見えないように保護する必要があるので、グリッドにより認証されるVirtual Organization (VO) は実験グループ単位で構築できる必要がある。実験データはファイルとして磁気ディスクやテープドライブなどの媒体に格納されるが、解析が進むにつれて、世界中に分散した実験グループのデータファイルが適宜、他の研究所にも複製として配られる必要がある。このため、数ペタバイト以上にもなる大量で、膨大な数になるデータファイルの複製機構とメタデータの管理機構がきわめて重要な役割を果たす。そのためには、大陸間の高遅延環境のネットワークを用いた高速のデータ転送を実現するために、複数のストリームを用いたデータ転送機能が重要となる。

データ解析に用いられる計算機資源はそれぞれの実験グループで、PCにして数千台から数万台の規模になるが、これらの資源が柔軟かつ透過的に1つの計算資源として有機的に機能するためには、計算資源の稼働状況のモニタリングや故障・エラーの追跡から、動的なジョブの再配分などのグローバルな運用支援機能を欠くことができない。

## データグリッド開発の現状

### ■ヨーロッパ

欧州機構 (EU) は基礎科学や教育の分野での情

報技術の応用を進めるプログラムの1つとして、EU DataGRID プロジェクト<sup>5)</sup>を承認し、2001年から3年間で、約11億円を投資している。対象となる主要なアプリケーションは、高エネルギー物理、地球観測、バイオメディカルの各分野で、CERN、ヨーロッパ宇宙機構 (ESA)、フランス CNRS、英国 PPARC、イタリア INFN、オランダ NIKHEF など21機関が参加している。開発研究の組織は、ミドルウェアの各機能要素からアプリケーション、普及促進、プロジェクト管理など12のワークパッケージで構成されている。2001年1月にスタートして、米国で始められていたグリッドのミドルウェアである Globus をベースに、高エネルギー物理での応用を主眼として、独自の開発整備が進められている。特に、データストレージ情報管理、データの所在データベース、ジョブコントロール言語、ファブリック情報の定義や簡単に移植できるパッケージ方式、自動初期設定機構などである。2002年の末には、5つの研究機関 (CERN、RAL、NIKHEF、CNAF、CC-Lyon) がテストベッドを構築した。それを使って、高エネルギー物理などの応用研究グループがテストを行いつつ、ミドルウェアの開発を続けている。このテストベッドを活用して、開発チームが教育プログラムを用意し、各国の学生や若手研究者がグリッド環境を使うための講習会を開催している。どこでも関心が高く2日間コースの講習会は、盛況のようである。

こうして、EU DataGRID を欧州での共同研究として進めると同時に、欧州各国では、グリッドに対する期待が大きく、それぞれの資金を投入して多様な分野で研究開発が始められている。たとえば、英国では、e-サイエンスと謳って、あらゆる研究分野にグリッドの考え方と環境を用意して、応用していこうとしている。東欧の諸国も含め、グリッドに対する関心は大変高く、どの国でも高エネルギー分野の研究者が主導しているように見える。

EU DataGRID の成果を CERN の LHC 計画のデータ解析に使うためのプロジェクトが、LCG (LHC Computing Grid)<sup>☆4)</sup>である。世界各国にできる地域データ解析センターで稼働させるための標準のミドルウェアをパッケージとして仕上げる任務を持っている。2003年夏を目処に、最初のバージョンが出る予定である。

### ■アメリカ

一方、米国の大学や研究所の高エネルギー研究者たちは、1999年頃からLHC計画に参加するグループを中心に、現在進行中の実験グループと共同して、データ

☆4) <http://www.cern.ch/LCG/>

iVDGL: International Virtual Data Grid Laboratory  
 DataTAG: Data TransAtlantic Grid  
 HICB: High Energy & Nuclear Physics InterGrid  
 Collaboration Board  
 GLUE: Grid Laboratory Uniform Environment  
 GriPhyN: Grid Physics Network  
 PPDG: Particle Physics Data Grid

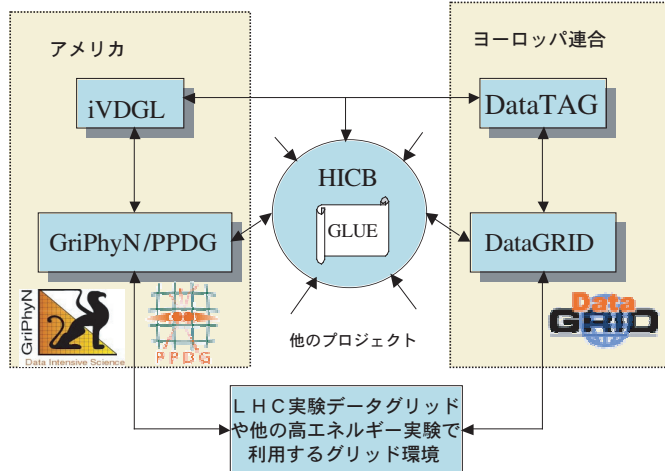


図-4 データグリッド開発プロジェクト間の相互運用フレームワーク

リッドを開発することを検討した。その結果、全米科学財団 (NSF) は、Grid Physics Network (GriPhyN) プロジェクトを、米国エネルギー省 (DOE) は、Particle Physics Data Grid (PPDG) を承認し、2つのデータグリッド開発プロジェクトが始められた<sup>6)</sup>。

GriPhyN プロジェクトは、2000年から2005年までの6年間に、約16億円を投じて、LHC計画の2実験、重力波観測やSDSS (Sloan Digital Sky Survey) 天体観測への適用を目指して実用データグリッド環境を開発するプロジェクトである。そのデータグリッド環境は、Virtual Data Toolkit (VDT)<sup>5)</sup>として、他の研究分野への適用も考慮して開発が進められている。米国エネルギー省 (DOE) の PPDG プロジェクトでは、現在進行している高エネルギー実験グループであるCDF, D0, BaBar, STAR への適用を対象として、2001年から2004年までの4年間に、約11億円をかけて、高エネルギー実験での実用を目指している。この2つのプロジェクトは、いずれもグリッド技術を開発している情報科学の研究グループの協力を得て、相補的に開発を進めている。どちらも、Globusをベースに、VOサーバ、ジョブスケジューラ (CONDOR)、ファイル転送 (GDMP<sup>6)</sup>、GridFTP)、ストレージ管理、ファイルのレプリカ管理 (SRM<sup>7)</sup>)などを強化したデータグリッドとしてのミ

ドルウェアを整備している。

米国は、LHCの複数の実験に参加しており、複数の研究機関が地域データ解析センターの機能を果たすことになっている。したがって、CERNを中心としたEU DataGridで開発したものと相互運用ができないのでは実用にならない。そこで、図-4のように、国や地域の高エネルギー物理関連のグリッドプロジェクト間の相互調整機関として、HICB (High Energy & Nuclear Physics InterGrid Collaboration Board)<sup>8)</sup>が、2002年から活動を開始している。この会合は、GGF (Global Grid Forum)と同じ周期で開かれるとともに、技術的な詳細な議論がメーリングリスト上で日常的に実施され、成果が上がっている。HICBは、共通基盤と共通インタフェースの整備などをGLUE (Grid Laboratory Uniform Environment)として進めており、資源情報サービス (MDS<sup>9)</sup>)での情報内容の統合を図るためにGLUEスキーマを定義した。相互に尊重している。また、パッケージ方式の統合化なども進めている。

アメリカ、ヨーロッパともデータグリッドのテストベッド網の整備と大西洋横断ネットワーク (25 Gbps)の整備がそれぞれiVDGL (米国)<sup>10)</sup>、DataTAG (EU)<sup>11)</sup>プロジェクトとして認められて、相互運用テストがWorldGrid<sup>12)</sup>として始まっている。ジョブのサブミッ

☆5 <http://www.lsc-group.phys.uwm.edu/vdt/>  
 ☆6 Grid Data Mirroring Package, <http://www.cern.ch/GDMP/>  
 ☆7 Storage Resource Manager, <http://sdm.lbl.gov/srm/>  
 ☆8 <http://www.hicb.org/>  
 ☆9 Monitoring and Discovery Service (Globus Toolkit)  
 ☆10 <http://www.ivdgl.org/>  
 ☆11 <http://datatag.web.cern.ch/datatag/>  
 ☆12 <http://www.ivdgl.org/demo/worldgrid/>

ション、データの移動、データレプリカの生成、およびその情報管理などのテストが行われている。このような、LHC 計画を目標にした開発整備と同時に、現行の大きな実験グループは、そのデータ解析を行うための計算機資源の共有にデータグリッド技術の適用を模索し、試しつつある。このように、開発中のグリッド技術を実際の大容量の実験データを広域に分散した資源で解析することに適用することで、高エネルギー物理でのミドルウェアの整備に、有用なフィードバックが行われることが期待されている。

## ■日本および他の地域

日本の高エネルギー物理研究者は、LHC 計画の ATLAS グループに参加しており、現在、東京大学素粒子国際研究センターが中心となり、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と共同して、LHC 計画のためのグリッド環境の整備、試験を行っている。また、産業技術総合研究所や東京工業大学などと共同で、データ解析の事象独立性に着目したミドルウェア Grid Datafarm (Gfarm) <sup>☆13</sup> の開発を進めている。一方、国内のネットワークは、2002 年から、国立情報学研究所のスーパー SINET <sup>☆14</sup> が稼働して、ギガビットネットワークが使えるようになった。高エネルギー加速器研究機構の B ファクトリー実験 (Belle) <sup>☆15</sup> では、毎日 400GB 以上のデータが収集され蓄積されている。実験に参加している東京大学、名古屋大学、東北大学などの大学では、このデータの一部を解析のテーマに応じてスーパー SINET を使って転送し、分散してデータ解析を行っている。今後は、この解析をデータグリッドの環境に移行していく予定である。

日本以外では、韓国、台湾、カナダ、オーストラリアなどでも高エネルギー実験のためのデータグリッドの開発とテストが進んでいる。いずれも LHC 計画に参加しており、LHC 計画は世界的に最も参加機関が多いので、そこで採用されるデータグリッド環境が今後の高エネルギー物理分野での標準となってくるであろう。

## まとめに代えて—これからの基礎科学とグリッド—

以上のように、高エネルギーの分野では、世界中の数百の研究組織から、数千人規模の研究者が参加し、同じ実験施設から得られる実験データをいっせいに解析し、物理学の研究を行うことになる。それに耐えるグリッド

環境の構築が始まっている。

グリッド技術が次第に実用に近づくにつれて、高エネルギー物理などの一部の分野のみならず、あらゆる社会的な活動に大きな影響を与えるであろう。その1つとしての基礎科学の研究についても、研究のスタイルが大きく変わる要素を提供する。印刷物による情報の共有は、人類の文化の源泉であった。それが、細いながらもネットワークによる通信ができる 20 世紀末になり、WWW による情報の共有が世界を席卷した。その次の段階として、ネットワークの高度化によって、情報の共有から、ネットワークに繋がるあらゆる資源が共有できるようになってきたのがグリッドの基本的なコンセプトである。あらゆる資源には、人間も含めることができる。研究分野によって、共有して価値のあるものが、データ、文書や図面情報、計算機資源、大規模なソフトウェア、実験装置、加速器や望遠鏡などの大型施設、研究者、ノウハウなどと異なる。高エネルギーや天文などでは、大規模な研究施設とデータの共有に価値がある。

グリッド環境とその上で動くアプリケーションが整備されれば、ネットワークに接続することで、実験施設を遠隔操作して、実験を進めたり、そのデータの解析ができれば、ユビキタスにサイエンスの研究が行える。このような研究体制を推進するプロジェクトが EU、アメリカなどで立ち上がりつつある。グリッド技術をベースとして、多くの研究分野で、それぞれの学生の教育、研究者の育成、実際の共同研究、領域を越えた研究体制の構築など、幅広く応用していこうとしている。日本においても、ナノテクノロジーやバイオなどの応用科学のみならず、基礎科学や教育など広い分野で、国際的にも展開する努力が必要であろう。

### 参考文献

- 1) LHC 計画, <http://www.cern.ch/LHC/>
- 2) ATLAS 実験, <http://atlasexperiment.org/>
- 3) 日本 ATLAS グループ, <http://atlas.kek.jp/public/>
- 4) The MONARC Project: Models of Networked Analysis at Regional Centre for LHC Experiments, <http://www.cern.ch/MONARC/>
- 5) EU DataGrid, <http://www.eu-datagrid.org/>
- 6) GriPhyN, <http://www.globus.org/>  
PPDG, <http://www.ppdg.net/>

(平成 15 年 4 月 24 日受付)

<sup>☆13</sup> <http://datafarm.apgrid.org/>

<sup>☆14</sup> [http://www.sinet.ad.jp/s\\_sinet/](http://www.sinet.ad.jp/s_sinet/)

<sup>☆15</sup> <http://belle.kek.jp/>

