

バイオグリッドの課題

下 條 真 司 ・ 伊 達 進

RCSS

文部科学省私立大学学術フロンティア推進拠点
関西大学ソシオネットワーク戦略研究センター

Research Center of Socionetwork Strategies,
The Institute of Economic and Political Studies,
Kansai University
Suita, Osaka 564-8680 Japan
URL : <http://www.rcss.kansai-u.ac.jp/>
<http://www.socionetwork.jp/>
e-mail : rcss@jm.kansai-u.ac.jp
tel. 06-6368-1228
fax. 06-6330-3304

バイオグリッドの課題

下 條 真 司 ・ 伊 達 進

RCSS

文部科学省私立大学学術フロンティア推進拠点
関西大学ソシオネットワーク戦略研究センター

Research Center of Socionetwork Strategies,
The Institute of Economic and Political Studies,
Kansai University
Suita, Osaka 564-8680 Japan
URL : <http://www.rcss.kansai-u.ac.jp/>
<http://www.socionetwork.jp/>
e-mail : rcss@jm.kansai-u.ac.jp
tel. 06-6368-1228
fax. 06-6330-3304

バイオグリッドの課題

下條 真司¹、伊達 進²

和文要約：

大阪大学サイバーメディアセンターでは、文部科学省 IT プログラム「スーパーコンピュータネットワークの構築」(バイオグリッドプロジェクト)を 2002 年度より推進している。本プロジェクトは、バイオサイエンスとコンピュータサイエンスの融合領域における研究開発を行っている。本章では、まず全体を通じてのキーワードとなるグリッドについて、その開発経緯、技術的特徴、研究開発動向の側面から概説する。その後で、本プロジェクトに至る着想、その目的、成果の一部、とくにセキュリティと複数のディスプレイを組み合わせた高精細画像表示方法について紹介し、当該プロジェクトを通じて得られた融合研究を推進する上でのノウハウと経験についても言及するとともに新しい融合領域分野における研究開発を推進する上での問題と課題について考察する。

キーワード：グリッド、融合研究、バイオグリッド

Survey of BioGrid Project

Shinji Shimojo and Susumu Date

英文要約：

The Cybermedia Center at Osaka University has been promoting a R&D project titled “Construction of a supercomputer network”, so-called BioGrid Project funded by MEXT since 2002. The project has been working at the interdisciplinary area of bioscience and computer science. In this chapter we consider the problems and issues in creating a new interdisciplinary research as well as the lessons learnt through the experience of

¹ 関西大学ソシオネットワーク戦略研究センター研究員、大阪大学サイバーメディアセンター・センター長・教授 <shimojo@cmc.osaka-u.ac.jp>

² 関西大学政策グリッドコンピューティング実験センター・特別任用助教授、大阪大学大学院情報科学研究科特別任用助教授 <date@ais.cmc.osaka-u.ac.jp>

promoting the project. In addition to that, a technical term and biogrid project is detailed and introduced in this chapter.

Keywords: Grid, interdisciplinary research, BioGrid

1. はじめに

近年、学術、ビジネスの両分野において、グリッドが着目されています。グリッドは情報技術の1つですが、大量データ処理を可能にする技術、計算資源や研究者の地理的分散問題を解決する技術としてその期待・注目が高まっています。近年の急速なネットワークおよび情報技術の発展は、コンピュータネットワーク、すなわちインターネットで交換される情報量を飛躍的に増加させ、その結果当該分野において問題解決に必要とされるデータ処理能力への需要をより高めています。また、科学技術研究の分野においては、この要因として科学データ計測技術の精度向上も挙げられます。今日の科学技術データ計測機器、たとえば、MRI や CT といった医療機器をとってみても、時間空間解像度をますます向上させており、その結果としてより高効率かつ高速な解析計算が求められる傾向にあります。

また、その一方で近年の情報技術およびネットワーク技術の急速な進展は、学術、ビジネスの分野におけるボーダーレス化を推し進めています。ネットワーク技術の発展は、大学、研究機関、企業といった1組織内だけでなく、それらの組織間でやりとりされる情報量を飛躍的に増加させています。このため、学術、ビジネスの分野では、物理的な組織を超え連携することの必要性・重要性が叫ばれており、計算資源や研究者の地理的分散問題を解決する技術としてのグリッドへの期待が非常に高まっています。

グリッドは1990年代に広域分散計算技術として、米国アルゴンヌ研究所のイアン・フォスター(Ian Foster)博士らによって研究開発が開始された技術です。研究開発当初は、米国に分散する複数のスーパーコンピュータや大規模クラスタ計算機をインターネット上で接続し、あたかも1台の大型スーパーコンピュータを構築する技術という HPC (High Performance Computing : ハイパフォーマンス) の側面に焦点が置かれていました。しかし、上記のような社会的な背景から様々な変遷を通じ、現在ではグリッド技術はインターネット上に分散する、コンピュータ、ストレージ、科学データ計測機器などの計算資源を動的に仮想組織 (Virtual Organization) 化するという側面に焦点がおかれ世界規模で研究開発が進められる技術となっています。

大阪大学サイバーメディアセンターでは、このような社会の要請と世界規模で研究開発されているグリッドにいち早く注目し、1995年からグリッドに関する研究開発を開始しています。当初は、当該技術を医療アプリケーションに応用し、欧米を中心に研究開発されているグリッドの有用性を検証することから開始しましたが、2002年にはそれまでに研究開発された技術や、蓄積された経験や知識をもとにバイオグリッドプロジェクトを開始す

るに至りました。本プロジェクトは、文部科学省の IT プログラムに「スーパーコンピュータネットワークの構築」という提案で採択されたもので、関西を中心とする製薬企業や IT ベンダー、大学の研究者や技術者が参画する研究開発プロジェクト¹⁾です。本プロジェクトでは、関西圏で優位性のあるバイオサイエンスのために真に有用なグリッドを代表とする情報技術を創生するだけでなく、当該技術をいち早く産業界へフィードバックすることを目的としています。本論文執筆時点において、本研究プロジェクトは5年目の最終年度を迎えています。

本章では、バイオグリッド事はじめというタイトルで、バイオグリッドプロジェクトについてまとめてみたいと思います。その中で、バイオグリッドプロジェクトの取り組み内容、成果に触れながら、情報技術の科学への応用に関する業績と今後の課題という観点からバイオグリッドプロジェクトを振り返りたいと思います。これを通じて、今後の融合研究に求められるものについて考えたいと思います。

本論文では、まず2節で本論文のキーワードとなるグリッドについて概説します。その後、3節ではバイオグリッドプロジェクトの目的と実施体制について概説し、その後バイオグリッドプロジェクトでの研究成果と今後に向けた研究内容について紹介します。4節では、今日までのバイオグリッドプロジェクトを振り返り、情報技術とバイオサイエンスの融合に向けた取り組みについて考察し、融合研究に求められるものはなにかについて考察します。5節で本論文をまとめます。

2. グリッドとはなにか？

グリッドは 1990 年頃提唱されはじめた技術用語で、それ自身がある特定の技術を指し示すものではありません。グリッドそのものは、「動的かつ複数組織による仮想環境上で資源共有を実現し問題解決を可能にする技術」²⁾と定義される概念でしかありません。つまり言い換えれば、グリッドの概念を実現するグリッド技術は複数存在することになります。

本節では、本論文を通じてのキーワードとなるグリッドについて、その歴史、技術、動向という3側面から概説します。

2.1 グリッドの歴史

グリッドは 1990 年頃米国アルゴンヌ国立研究所、シカゴ大学を中心に提唱され、研究開発が盛んになった研究分野です。開発当初は、米国国内の複数の研究機関や大学のスーパーコンピュータを高速ネットワークで接続することで、それまで計算不可能とされたり、非常に長い計算時間がかかってしまう物理学研究などでみられる大規模シミュレーションを高効率に計算することを目的とした、大規模計算技術としての研究開発が行われていました。その頃、Globus (グローバス) プロジェクト (現 Globus アライアンス)³⁾は、その

ような研究開発をコミュニティベースで推進していくためのプロジェクトとして産声を上げています。

Globus プロジェクトは、グリッドの概念を実現するためのツールキットとして、Globus grid toolkit を 1990 年代よりリリースし続けています。グリッドは概念を示すに過ぎないと先述しましたが、この Globus grid toolkit はグリッドの概念を実現する技術の 1 つといえます。しかし、今日では Globus grid toolkit はグリッドを実現するデファクトスタンダード (de facto standard : 事実上標準の) 実装となっており、そのため現在では多くの研究者や技術者はこのツールキットを利用して研究開発を進めています。

上述したように、グリッドは大規模系計算技術として、その研究開発が始まりました。もうすこし技術的に表現すると、インターネット上に分散する大規模計算資源を中央集権型の密結合により集約する技術として研究開発がなされてきました。しかし、その語 Java 言語を主として用いるウェブサービス技術が非常に注目を集めるようになってきました。ウェブサービスは、グリッドとは対称的に地方分権型の疎結合による分散計算技術としての側面を有しています。

このような背景から、分散計算のための技術の統合をグリッドの研究コミュニティは鑑み、2002 年にカナダのトロントで開催されたグリッド技術の標準化を推進する国際フォーラム GGF (Global Grid Forum)^[4]を境に、ウェブサービスの概念との融合を進め、OGSI (Open Grid Service Infrastructure) という新しいグリッドの形を提唱するに至りました。この OGSI では、ウェブサービスの疎結合型の分散コンピューティング、それまでのグリッドの密結合型の大規模計算技術の特徴を共に有する OGSA (Open Grid Service Architecture) が提案されています。この OGSI を利用することによって、グリッドアプリケーションの開発者は、ユーザがウェブブラウザを通じて大規模計算資源を利用するといった仮想計算環境を構築することが容易になりました。

しかし、その後暫くして WSRF (Web Services Resource Framework) という新しいアーキテクチャが提唱され、OGSI は現在では 1 世代前のアーキテクチャとなっています。図 1 (OGSA から WSRF) はグリッドとウェブ技術の関係を示しています。図が示すように、ウェブサービス技術も、グリッド技術もそれぞれお互いの標準化動向を探りながら歩み寄っていたのですが、それまで提唱されていた OGSI アーキテクチャではウェブサービス技術とスムーズに技術的に連携できないという判断から、新しい WSRF というアーキテクチャが提唱されました。

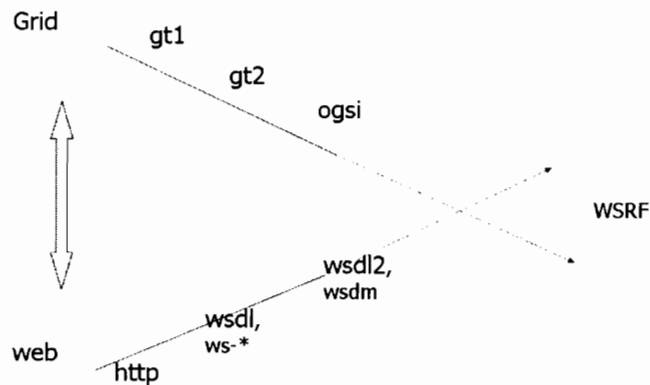


図1 OGSi から WSRF へ

グリッドは、上述のようは変遷を経て研究開発がなされている技術です。そのため、グリッドというと、大規模計算技術、仮想空間形成技術等さまざまな見方があるようです。しかし、これらはグリッドの一側面でしかありません。グリッドとは、このような大規模計算や仮想環境を形成するための技術そのものといえます。今日では、2004年に提唱された WSRF というアーキテクチャがグリッドを指し示すものとして使われており、様々な研究機関、大学、企業の研究者や技術者がグリッドの研究開発を行っています。しかし、情報通信技術は日々めまぐるしく発展・発達しているため、グリッドは今後さらに変遷をしていくこともありえます。

2.2 技術的特徴

2.1 節でグリッドの歴史について概説いたしました。本節では技術的な観点からグリッド技術について概説したいと思います。

2.2.1 WSRF (Web Service Resource Framework)

今日のグリッドでは、グリッド技術は先述したとおり、ウェブサービスと大規模計算技術の融合という観点から新しいアーキテクチャが提唱されています。最新のグリッドアーキテクチャである WSRF (Web Services Resource Framework)^{[5][6]}では、それまでのウェブサービスに見られなかった新しい特徴を有しています。以下ではまず WSRF にみられる特徴について概説します。その後で、大規模計算技術としてのグリッド技術について説明します。

WSRF とウェブサービスを比較する上での最大の特徴は、WSRF では状態をもつ (stateful : ステートフル)ウェブサービスの構築が可能になった点が挙げられます。もう少し正確にいうと、ウェブサービスでは、このようなウェブサービスに状態を持たせるような仕組みは提供していない(stateless : ステートレス)のに対し、WSRF ではそれに基づいて構築されるウェブサービスの状態を保持できます (WS-Resource)。

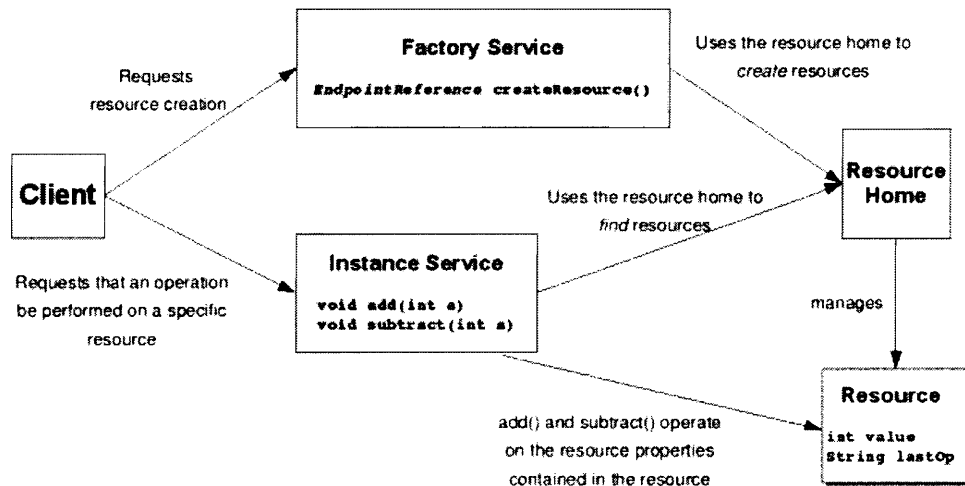


図 2 WSRF における状態管理メカニズム (出展) Globus Alliance ウェブページ

図 2 は上述の状態管理メカニズムを示したものです。クライアントであるユーザは、Resource にある状態を利用して変数等の状態をグリッドサービスを提供するサーバ上に保持でき、グリッドサービスの状態をサービス終了時まで管理できる。ウェブサービスでは、このような仕組みがないため、クライアントであるユーザは一度のアクセスで一度きりしかアクセスができません。WSRF では、このような仕組みを利用して、長時間を要する科学技術シミュレーション等の計算の状態を保持できるウェブサービス (グリッドサービス) を構築することが可能となっています。

また、もうひとつの特徴として、通知サービスの構築が実現されたことが挙げられます (WS-Notification)^[7]。図 3 は通知サービスのメカニズムを示したものです。この通知サービスを利用することによって、あらかじめ登録(subscribe)していた出来事を、その出来事発生時に通知してもらうということが可能になります。この機能を利用することで、例えば計算機の負荷がある一定以上になったり、計算が終了した場合に通知してもらうということが可能になります。これらを利用することでより容易に分散計算環境を構築することが可能になります。

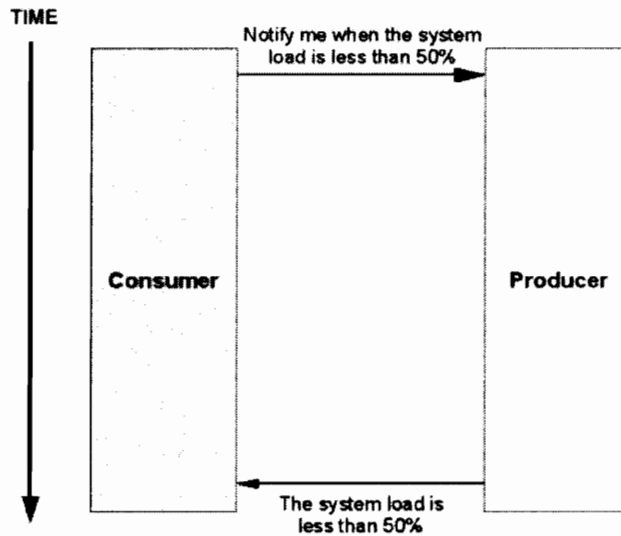


図3 WS-Notification: Globus grid toolkit 内で実現される通知サービスの例。この例ではシステム負荷が50%以下になったときに Producer から Consumer から通知が行われる。

2.2.2 大規模計算技術としてのグリッド技術

次に、大規模計算技術としてのグリッドの技術的特徴を概説します。前述したように、研究開発当初グリッド技術は、高速ネットワークに接続された複数のスーパーコンピュータを中央集権的に集約する密結合型の分散並列計算技術としてスタートしました。このような密結合型の計算技術を実現するためのツールキットとして、Globus grid toolkit が Globus プロジェクトで開発されていますが、ここではこの Globus grid toolkit を構成する要素技術のうち、大規模計算技術を主目的として開発されたセキュリティサービス、資源管理サービス、情報管理サービスの特徴を概説します。

Globus grid toolkit におけるセキュリティは、GSI(Grid Security Infrastructure)とよばれる認証基盤サービスと、そのサービスを提供するアプリケーションプログラミングインタフェース(API:Application Programming Interface)によって実現されています。GSIは、公開鍵認証基盤(PKI: Public Key Infrastructure)に基づき X.509 証明書を用いた認証を実現する認証基盤^{[8][9]}です。図4を用いて説明します。

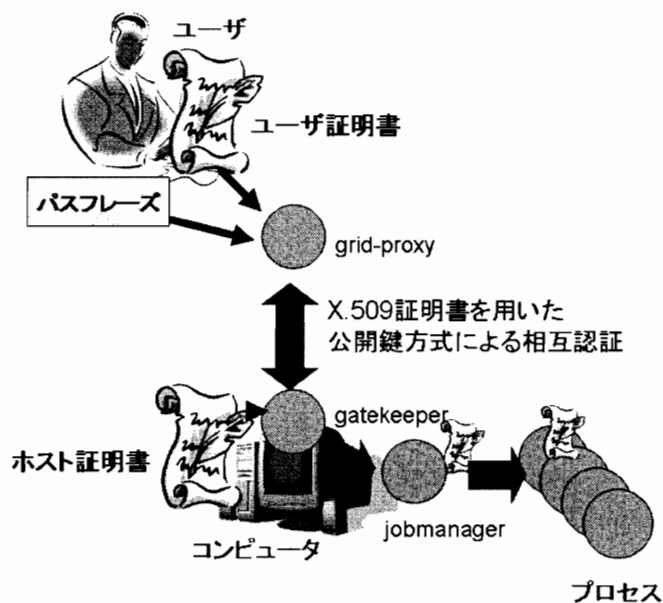


図4 GSI の認証: GSI の認証ではユーザ証明書と入力されるパスフレーズからユーザの代わりに認証を行う **grid-proxy** が生成され、ジョブを投入する先のコンピュータの **gatekeeper** と相互認証を行う。その際、すべてのエンティティ間で公開鍵方式による相互認証がなされます。

この GSI では、ユーザだけでなく、インターネットに接続されるコンピュータやストレージ、コンピュータ上で実行されるプログラムの実体であるプロセスまでもが X.509 証明書に基づく認証によって認証が行われます。つまり、ユーザ、コンピュータ、プロセスといった実体は、すべて証明書を提示することでお互いの存在を確認するという仕組みになっています。このお互いの存在を確認する作業時に、公開鍵暗号理論に基づく暗号・復号計算が行われ、数学的に厳しいチェックが行われています。このような原理で、グリッドのための安全な認証基盤が実現されています。また、一般的にセキュリティを高めると、使いやすさが低下するというトレードオフの問題がありますが、GSI ではシングルサインオン(Single Sign-on)と呼ばれる技術が確立されており、ユーザは一度パスフレーズ(pass phrase)を入力するだけで、上述したような安全性が保たれた上で、グリッド上のすべての計算資源を利用できるということが実現されています。また、このような GSI が提供する API を用いて、グリッド環境上で研究者や開発者が安全なアプリケーションを開発することが可能となっています。

資源管理サービスは、上述の GSI による認証が確立された上で実現されるもので、コンピュータ上で実行されるプログラム(プロセス)の状態を監視・管理します。Globus grid toolkit では、この資源管理サービスは GRAM (Grid Resource Allocation Manager)^[10]とよ

ばれるサービスと、それを利用するためのアプリケーションインタフェースによって実現されています。図5は、資源管理サービスがどのように機能するかを示したものです。Globus grid toolkitでは、ユーザはRSL(Resource Specification Language)と呼ばれる記述言語を用いてグリッドによって実現される分散環境に計算ジョブを投入しますが、ゲートキーパー(gatekeeper)と呼ばれるソフトウェアがその計算要求を受信し、実際の計算機上でプロセスを複数生成します。その際、ゲートキーパーはジョブマネージャー(job-manager)を生成し、このジョブマネージャーを利用して、プロセスの正常な終了まで監視します。このメカニズムによって、広域に分散する計算環境においてもジョブの実行状態を把握することが可能になっています。

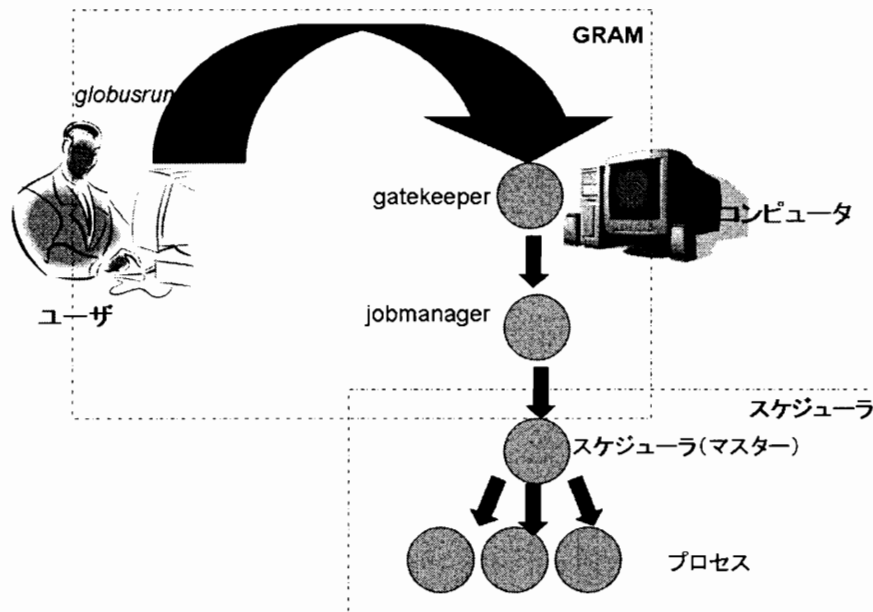


図5 GRAM(Grid Resource Allocation Manager)

最後に情報管理サービスについて説明します。グリッドでは、多様な計算資源が接続されることによりグリッド環境が実現されますが、その実現のためには分散する計算資源の状態を管理するための情報管理技術が必要不可欠となります。グリッドでは、例えば、コンピュータのプロセッサのアーキテクチャや、ストレージの容量などといった静的な情報と、計算負荷の情報やネットワークトラフィックの状態に関する情報などの動的な情報の管理を効率的に行う必要がありますが、Globus grid toolkitではMDSとよばれるLDAP(Light-Weight Directory Access Protocol)ベースの情報管理によりこれが実現されています。ユーザはLDAPに登録される情報に対して問い合わせを行うことで、グリッドにおける静的かつ動的な情報を取得することが可能となっています。

2.3 グリッド研究開発の動向

2.2 節ではグリッドの技術的な特徴を概説しましたが、本節ではそのようなグリッドに関する研究開発が世界でどのように行われているかについて概説します。

グリッドは、上述してきたように、広域に分散する計算資源を動的に集約することにより、広域環境上で仮想組織を実現可能にする技術です。このような技術の有効性を検証し、真に有用なグリッド技術や関連する情報技術を実現するために、今日では複数の研究機関、大学、企業等の研究者や技術者の参画する数多くのグリッドプロジェクトや研究コミュニティが形成され、その研究開発が推進されています。

わが国においても、大阪大学が中心に推進するバイオグリッドプロジェクトのほか、NAREGI(National Research Grid Initiative)^[11]が推進されています。NAREGI プロジェクトは広域分散型の最先端研究教育用大規模計算環境を実現するための、実運用に耐える品質のグリッド基盤ソフトウェアを実現することを目的として推進されており、現在6つの研究課題を柱にわが国の数多くの研究機関、大学、企業の研究者や技術者が集い研究開発を日夜進めています。本論文執筆時まで、NAREGI プロジェクトでは、グリッド基盤ソフトウェアとして、NAREGI α をリリースしており、2006年5月に新しいグリッド基盤ソフトウェア NAREGI β をリリース予定としています。

また、グリッドに関する研究開発は、国内との研究機関や大学だけでなく、海外との研究機関や大学との連携により強く推し進められる傾向があります。近年のネットワーク技術の発展やグリッド技術の成功は、世界規模で交換される情報やデータ量を飛躍的に増加させました。その結果、バイオ、物理、ナノテク等の実際科学の研究分野においても、諸外国の研究機関や大学と連携することの重要性・必要性が高まっています。そのため、グリッドをとりまく研究開発は国内だけにとどまらず世界規模で連携して推進される傾向が生まれています。

このように諸外国の研究機関や大学の研究機関が参画し、グリッドに関する研究開発を推進している一例として、本論文筆者らも参画している研究コミュニティ PRAGMA^[12]をあげることができます。PRAGMA は Pacific Rim Applications and Grid Middleware Assembly を略したものですが、この研究コミュニティではその名の示すとおり、環太平洋周辺諸国の研究機関・大学が参画し、グリッドアプリケーションおよびミドルウェアに関する研究が行われています。本研究コミュニティでは、本論文執筆時点、バイオサイエンスへのグリッド技術の応用を目的としたバイオサイエンス WG (ワーキンググループ)、広帯域ネットワークを必要とするアプリケーションを対象とするテレサイエンス WG、研究コミュニティで利用するグリッド環境の運用と構築を目的とするリソース WG、データ集中型アプリケーションを対象とした技術開発を目的とするデータグリッド WG の4つのワーキンググループが活動を行っていますが、対象とするアプリケーションはバイオサイエンス、テレサイエンス等の分野に限定されるものでなく、今日多方面からの研究者や科学

者がグリッド技術に関して議論を行い、日夜研究開発を行っています。

また、このような世界規模で研究開発されるグリッド技術をまとめあげひとつの方向へ導くための標準化団体として GGF (Global Grid Forum) が形成されており 1 年に 3 回の頻度で世界各国で国際フォーラムが開催されています。ここには世界中の大学、企業、研究機関の研究者、技術者が集い、次世代のグリッド技術およびグリッド技術に関する標準化策定作業を進めています。

このように今日のグリッド研究は、科学やビジネスの分野において同じ目的をもつ研究者や技術者がコミュニティやプロジェクトを形成し、推進される傾向があります。その理由のひとつとして、広域に分散する計算資源を互いに利用するグリッド環境を実際に構築し、その上で実用的なグリッドアプリケーションを構築することに目的があることが挙げられます。また、複数の研究機関や大学の研究機関と互いに連携することで、当該分野における新たな知見や発見を得られる可能性があるということもその理由としてあげられます。今日、科学の分野で取り扱う問題のサイズは、情報技術の発展やネットワーク技術の発展によるデータサイズの増加などの要因から大規模化傾向にあります。そのため、研究者個人で取り扱うことのできる問題は少なくなりつつあり、ますます研究者らのチームプレイによる研究開発が必要となってきました。そのようなことから、真に有用なグリッド技術の創生のためには、このようなコミュニティやプロジェクトベースで研究開発が進められていくと考えられます。

3. バイオグリッドプロジェクト

本論文 2 節では、グリッドとは何か、について概説するとともに、グリッド技術が研究コミュニティやプロジェクトベースで推し進められていることを論じました。本節では、大阪大学で 2002 年度より推進されているバイオグリッドプロジェクトについて論じます。本節の目的は、バイオグリッドプロジェクトがどのような目的をもち、その目的のためにどのような体制で実施され、どのような成果が導出されているかを検証することにあります。本節での検証を基に、4 節で融合研究の問題と課題について考察したいと思います。

3.1 プロジェクトの目的と実施体制の概要

生命科学や医学・創薬の分野では、研究の焦点が生体を構成するたんぱく質の構造や機能解析等のポストゲノム研究へと移行が進んでいます。このようなデータ、情報を解析し研究を推進するためには、多様なデータや情報を高速に処理することが必要不可欠となっています。また、ゲノム医療・ゲノム創薬の要求の高まりは、ゲノム、細胞、器官、臓器を経て固体レベルに至る幅広い範囲のデータを取り扱う必要性を生みだしています。このようなデータの多様性を反映して、今日 500 個近くの関連データベースが存在すると考え

られており、このような多様なデータを効率的かつ効果的に利用できる情報処理環境の必要性がいま叫ばれています。

また、バイオ、医療研究は、遺伝子データや個人情報などの漏洩に極めて繊細な性質を有しています。そのため、このようなデータセキュリティを必要とするデータを扱うためには、高度なセキュリティ技術が必要とされます。

文部科学省の IT プログラム「スーパーコンピュータの構築」すなわち、バイオグリッドプロジェクトは、上記のような背景と問題を鑑み 2002 年から 5 ヶ年計画で始まった研究開発プロジェクトです。本研究開発プロジェクトでは、次世代バイオ研究のための共通インフラストラクチャとしての安全なグリッド環境を提供すると共に、新しいグリッド基盤技術の創生、さらにはバイオ研究そのものの発展をも目的としています。具体的には、医学・生物分野に特化したアプリケーションが必要とする共通基盤をグリッドミドルウェアとして開発するとともに、そのミドルウェアで稼動するアプリケーションとともに世界中の研究コミュニティに提供することを目的としています。

このような目的のために、大阪大学およびその周辺の関連研究機関が世界的にリードしている医学、生物分野に特化した IT 応用研究を推進することを視野にいれ、高度な計算機資源とネットワーク資源が集約されているサイバーメディアセンターを核とした研究開発体制を整備し研究開発を進めています。バイオグリッドの研究開発体制の特徴は、グリッド基盤技術、テレサイエンス、コンピューティンググリッド、データグリッド、そしてビジネス化の 5 つの研究開発およびそれを支援するグループから構成されていることが挙げられます。グリッド技術がスーパーコンピュータやクラスタを用いた大規模分散計算という観点から研究開発が推進されてきたため、高性能科学技術計算のための技術と考えられる傾向があり、これはグリッド技術の一側面にしか過ぎないことは 2 節で論じたとおりですが、バイオグリッドプロジェクトでは開始当初よりグリッドの持つべき特色と次世代バイオ研究の要請から上記の 5 つのグループを形成しています。

この 5 つのグループは、(1) グリッド基盤技術グループがセキュアで高性能なグリッド技術の研究開発を行い、(2) テレサイエンスグループが Spring-8 や超高压電子顕微鏡等の高性能解析装置の接続と解析データの共有を実現し、(3) コンピューティンググリッド技術グループがたんぱく質の構造予測や各種生体シミュレーション技術の研究開発を行い、(4) データグリッド技術グループが多様なバイオデータベースの連携技術を開発する、(5) ビジネス化グループが利用者としての創薬グループと開発技術の橋渡しをし、ビジネス化への展開を行う、という関係で互いに連携し研究開発を推進しています。

本論文では、本論文の筆者らにもっとも関連の深い (1) グリッド基盤技術グループでの研究内容と研究成果、および本論文執筆時に取り組んでいる活動について紹介したいと思います。

3.2 セキュアファイルシステム GSI-SFS

本節ではグリッド基盤技術グループにおけるバイオグリッドプロジェクトでの研究成果であるセキュアファイルシステム GSI-SFS について論じる。本節では特に、研究成果の技術側面だけでなく、この研究成果がどのように生み出されたかについて報告します。

3.2.1 セキュアファイルシステムが生み出された背景

バイオグリッドプロジェクトでは、創薬や医療へのグリッド技術の応用と、当該分野のための情報技術の研究開発が行われている。創薬や医療といった研究分野においては、テーラーメイド医療(**tailor-made medicine**)といったキーワードに代表されるように、個人のプライバシーにかかわる情報や、秘匿性の高いデータを扱う必要がある。

一方、グリッドは、公共のコンピュータネットワーク、すなわちインターネット上で広域に分散するコンピュータ、ストレージ、医療機器などの科学データ計測機器等の計算資源を動的に集約し、実際科学の問題を解決するための方法を提供する技術である。そのため、上述のようなデータセキュリティ属性を有するデータを用いる場合、グリッドの応用がこの問題のために困難になる場合がある。

今日までの研究開発によって、グリッド技術はより高度なものへと発展しつつある。実際、Nimrod-G^[13]、Condor-G^[14]などのグリッドミドルウェアをはじめ、グリッド上でのアプリケーション開発を容易にする CoG などのように、より高度で使いやすい技術の開発が実現されている。しかし、その一方でデータセキュリティに関しては、ユーザの期待するセキュリティとグリッドの提供するデータセキュリティにギャップがあるのが現状である。そのために、医療、バイオ等のデータセキュリティが要求される研究分野では、グリッド技術の普及が妨げられている現状がある。

バイオグリッドプロジェクトにおいてもこのことは例外でなく、グリッド環境上でのデータアクセスに対するセキュリティが問題となる。バイオグリッドプロジェクトでは、さまざまな研究分野の研究者や技術者らが参加するため、データアクセスに対する要求もまた多様なものとなる。バイオグリッドプロジェクトでは、このようなユーザからのデータアクセス要求の多様性に着目し、グリッド上での新しいデータアクセスモデルを検証し、次に述べるセキュアファイルシステム GSI-SFS が誕生することになりました。

3.2.2 システム要求とシステム概要

グリッド基盤技術グループでは、バイオグリッドプロジェクトに参画する研究者らのデータアクセスに対するセキュリティ要件を検証した結果、グリッド上での分散データに対するアクセス手法に求められる機能を下記の5つにまとめています。

- (1) シングルディスクイメージ (Single Disk Image) :

ユーザはデータの所在について意識することなく、ローカル/リモートの区別なく、あたかも 1 箇所にハードディスクがあるかのようにデータアクセスをしたい。

(2) 機密性を有すること (Confidentiality) :

ネットワーク上のデータを第 3 者に知られたくない。

(3) 排他性を有すること (Exclusiveness)

ユーザは自身がアクセスしているデータ情報に関して第 3 者に知られたくない。

(4) ユーザが容易に利用できること (User Convenience)

セキュリティを強化するために、グリッド上のデータへのアクセスを不便にしたい。

(5) オンデマンドにデータアクセスが可能であること (On-demand)

必要に応じて動的にデータへアクセスすることにより、セキュリティ強度を向上したい。

グリッド基盤技術グループでは、上述のデータアクセスに求められる 5 つの機能から、セキュアファイルシステム GSI-SFS を開発しています。図 6 はセキュアファイルシステムの技術構成を示しています。

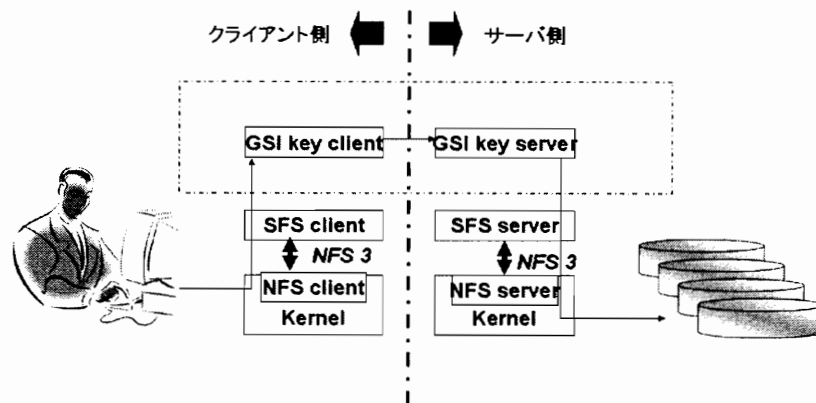


図 6 セキュアファイルシステムの技術概要

セキュアファイルシステム GSI-SFS は、その名の通り GSI(Grid Security Infrastructure)と SFS (Self-Certifying Filesystem) を基礎技術として実現されています。GSI は本論文 2 節で解説したように、X.509 形式の電子証明書を用いる公開鍵基盤 (PKI: Public Key Infrastructure) であり、ユーザ、計算機、プログラムの実体であるプロセスの

相互認証を可能にする特徴を有しています。また、この GSI はシングルサインオン機能を有しており、これによってユーザはたった一度の認証を行うだけでグリッド上に広く分散する資源を付与された権限内で利用することができるようになります。後者の SFS^[15]は、MIT の David Mazieres 博士らによって開発されたファイルシステムで、ネットワーク通信を暗号化するだけでなく、ユーザごとに安全なシングルディスクイメージを提供するものです。

セキュアファイルシステム GSI-SFS は、これら 2 つの技術を構成して実現したのですが、具体的には GSI によって提供されるアプリケーションプログラミングインタフェースを利用して GSI-SFS キークライアントとサーバを構築しています。ファイルシステム SFS は、それ自身でも上記のデータアクセスに関する要求のうち(4)ユーザ利便性以外の要件をみたすことのできる優れたファイルシステムです。しかし、ファイルシステム SFS では、データのある遠隔地のサーバとあらかじめユーザがそれぞれの認証のための設定をし、アクセスのたびにパスワードを入力しなければならないというユーザ利便性の問題があります。後者のパスワードの入力の問題に関しては、SFS に容易されているエージェントと呼ばれるプログラムを利用することで回避できるのですが、その場合においてもグリッドでデファクトスタンダードとなっている GSI によるシングルサインオンとの連携ができないために、GSI の認証と SFS の認証が共存することになり、ユーザは異なるコンテキストでパスワード入力を要求されるということが生じます。また、グリッドのような数百、数千という規模での大規模を想定する計算環境下では、このような利便性の問題はユーザに対する負担を増大させ深刻な問題となります。

バイオグリッドプロジェクトでは、このような問題からセキュアファイルシステム SFS のための GSI 認証モジュールである GSI キークライアントとキーサーバを開発することにより、上記の 5 つの必要機能を満たすファイルシステムを構築することに成功しています^[16]。このファイルシステムを利用することにより、ユーザは一度パスワードやパスフレーズを入力するだけで、それぞれのユーザで複数の研究機関にまたがる、個別の安全なデータアクセス環境を構築することが可能となります。また、この GSI 認証は、ユーザによる遠隔地の計算機サーバにも計算ジョブを投入する際にも利用されるものであるため、ユーザはジョブ投入のために再度パスフレーズを入力する必要はありません。

3.2.3 セキュアファイルシステムの応用事例

3.2.2、3.2.3 節でどのような背景からセキュアファイルシステム GSI-SFS の研究開発が着想され、またどのような技術で実現されているかについてまとめました。以下では、その GSI-SFS を用いた応用事例の 1 つとして、中華人民共和国の国立研究所である中国科学院 (Chinese Academy of Sciences) との間で行われた 2003 年の共同研究活動^[17]について紹介します。

近年では、多様な生物種を保有している国家としてバイオ研究に携わる研究者や技術者らから中華人民共和国が関心を集めています。実際、中華人民共和国には1244の魚種、3862の鳥種が確認されており、他の国と比較してもこの数字は大きい数字となっています。中国科学院では、そのような背景から、2003年当時生物学の種や標本のデータベースを構築することを目的とした研究開発プロジェクトを開始していました。一方で、大阪大学ではすでにバイオグリッドプロジェクトをすでに開始し、大阪大学サイバーメディアセンターの保有する合計180プロセッサ規模のバイオグリッド基盤システム上にグリッド環境を構築しており、研究者らが研究開発をする環境が整備されていました。ここで紹介する共同研究開発は、大阪大学の大規模な計算資源を利用し高速データ処理を実施したい中国科学院と、中国科学院の保有するデータ資源に関心のある大阪大学によって実施され、その結果として計算資源およびデータ資源に関する位置透過的を有する次世代バイオグリッド環境のプロトタイプ構築の成功につながっています。

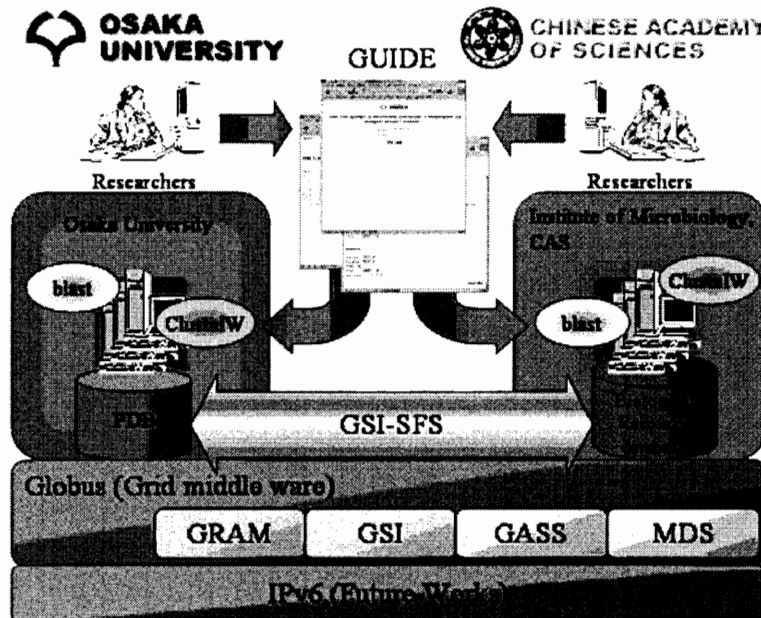


図7 中国科学院と大阪大学で構築された次世代バイオグリッド環境

図7は、中国科学院と大阪大学で構築された次世代バイオグリッド環境の概要を示しています。このグリッド環境では、本論文2節で説明した Globus grid toolkit をグリッド環境構築の基礎技術として採用しています。開発当時は、Globus grid toolkit としてバージョン 3.x がリリースされていましたが、ソフトウェアの安定性の問題から Globus grid toolkit version 2.x を利用して開発を行いました。さらに、このグリッド環境においては、3.2 節で説明した GSI-SFS をデータ資源の位置透過性を実現するために利用しています。また、図中の GUIDE は、バイオグリッドプロジェクトで開発されたグリッドポータルシステムを意味します。ユーザはこのグリッドポータルシステム GUIDE を用いることで、本グリ

ッド環境の中枢である、本論文2節で紹介したようなGSIやGRAMなどのグリッド機能を、グリッドの複雑さを意識することなく直感的にわかりやすいウェブインタフェースを通じて利用することが可能となっています。

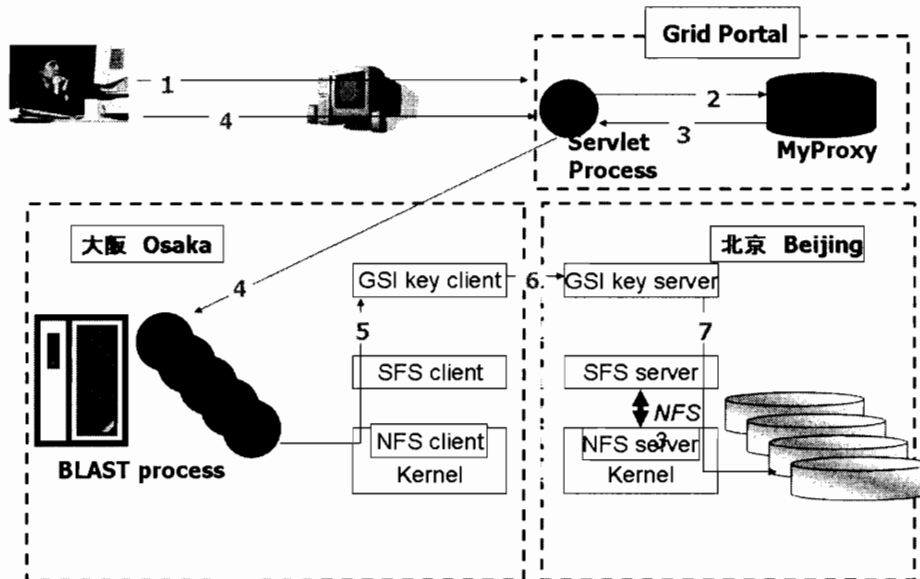


図8 位置透過性実現メカニズム

次に、このグリッド環境がどのようにデータ資源、計算資源の透過性を実現しているかを説明します。図8は上記の図7であらわされるグリッド環境をセキュリティ技術要素に着目して記述した相関図を示しています。図中の番号を利用し、本グリッド環境上でユーザがどのように中国科学院のデータ資源および大阪大学の計算資源を位置透過的に、すなわち所在を気にすることなく利用することができるかについて以下で説明します。

- (1) ユーザはグリッドポータルサーバを通じて、ユーザ ID とパスワードを入力します。
- (2) (3) ユーザ ID とパスワードを受信したグリッドポータルサーバ上のサーブレットプロセスは MyProxy と呼ばれるオンラインクレデンシャルサービス (On-line Credential Service : ユーザはそのユーザに発行された X.509 形式の証明書をあらかじめここに登録している。) から、X.509 形式の証明書を取り出し、これを用いて、これ以降の処理のためにクレデンシャル(Credential)を有効化します。
- (4) ユーザは任意のデータベースをウェブブラウザから選択し、そのデータベースに対し実施したい解析手法を選択します。

ユーザが解析処理としてバイオ研究で非常に利用頻度の高い BLAST を選択し、中国科学院に配置されたデータベースを選択した仮定した場合、このとき BLAST の

プロセスが、(3) で有効化されたクレデンシャルを利用した相互認証後、大阪大学サイバーメディアセンターの計算機システム上に生成されます。

- (5) (6) (7) 大阪大学サイバーメディアセンターの計算機システムで生成された **BLAST** のプロセスはユーザから指定されたデータベースへのアクセスが始めて発生した場合、バイオグリッドプロジェクトで開発した **GSI-SFS** キーエージェントと **BLAST** プロセスの間でクレデンシャルを利用した相互認証が行われ、認証が成功すると自動的に中国科学院のデータベースサーバのファイルシステムを大阪大学サイバーメディアセンターの計算機システムにマウントし、引き続き **BLAST** 計算を行います。

中国科学院と大阪大学で構築された次世代バイオグリッド環境では、上記のように様々な情報技術が相互連携し、その結果としてユーザにデータ資源および計算資源の位置を意識せずに大規模計算を可能にするシナジー効果をもたらしています。

中国科学院との共同研究では、お互いのもつ資源、すなわち大阪大学の計算資源、中国科学院のデータ資源をグリッド環境上で補完的に利用するというグリッド研究開発のひとつの目的に即したモデルに基づいた次世代のグリッド計算環境を示しました。本論文で紹介した中国科学院と大阪大学との共同研究で実現されたグリッド環境は、今日最新の技術を用いることによりもう少し異なったアプローチで実現することができるようになっていきます。しかし、研究開発当時では、このように一貫したセキュリティ技術に基づく位置透過性を有するグリッド環境を実現することを示したことは非常に画期的なものでした。グリッド技術は常に進化しています。われわれグリッド基盤技術グループはつねに最新の技術動向を調査し、科学への応用という観点と、新しい情報技術の開発という観点から研究開発を行っています。

3.3 次世代の情報技術研究開発へむけた取り組み

本節では、現在グリッド基盤技術グループとして現在活動を行っている取り組みの1つを紹介します。バイオグリッドプロジェクトは2006年度が最終年度となりますが、次世代のグリッド技術を中心に情報技術をつねに追求していますが、下記では高解像度な画像や映像をグリッド環境で共有し、複数研究機関でディスプレイを共有可能にする技術について紹介します。

3.3.1 タイルドディスプレイ (Tiled display) 導入の背景

近年、学術・ビジネスの分野において取り扱われるデータ量が増大する傾向にあります。特に、バイオサイエンスで扱われるデータ量は、ギガバイトからテラ(Tera)バイト級となり、

(Peta)バイト級にも迫ろうかという勢いになっています。その結果として高性能計算技術であるグリッドが今日その重要性・必要性を増していることは前述の通りです。

今日、データ量増加の要因のひとつとして、科学データ計測機器の高精度化・高解像度があげられます。身近な例をとってみても、デジタルカメラの解像度は700万画素クラスになっており、MRIやCTといった医療機器などの科学データ計測機器の高精度化・高解像度化は著しいものがあります。そのため、科学データ計測機器から高解像度な画像や映像を取得したとしても、縮小することなく一度に表示することができない現状が生じています。

また、近年のグリッド技術に代表される情報技術は、研究機関や大学などの地理的分散問題を小さくし、コンピュータネットワークを通じて交換・共有されるデータ、情報、および知識量を膨大なものにしていきます。さらに、このような状況は、物理的な組織構造に依存せずデータや情報が交換されるというボーダーレス化現象を引き起こしています。このため、これまで異なる分野と考えられていた研究者同士が情報を交換し研究を行う機会が増大する一方で、新たな研究領域や分野が開拓されつつあります。そのような状況はバイオサイエンスにおいては特に顕著となっており、“マルチスケール”というキーワードに代表されるように、これまで異なる研究分野で研究をしていた研究者、たとえば、細胞、組織、器官という異なる対象を研究する研究者らがそれぞれの研究成果を結びつけ、あらたな科学的発見を見出そうとする共同研究が始まっています。しかし、このような共同研究を効率的に支援する研究環境あるいは研究プラットフォームはいまだ実現されていないのが実状です。

このように、データ量の増加は、単にデータ解析の効率化という観点からの高性能計算だけでなく、物理的な画像表示の問題や、新しい研究環境あるいは研究プラットフォームへの期待をも引き起こしています。そのような観点から、大阪大学サイバーメディアセンターではタイルドディスプレイ (tiled display: タイル上に並べられたディスプレイ) と呼ばれる可視化装置を導入し、上記のような問題を解決すべく研究開発を開始しています。以下では、タイルドディスプレイ、およびそれを用いた今後の研究開発について紹介します。

3.3.2 タイルドディスプレイとは何か？

タイルドディスプレイは、基本的な構造として表示部と駆動部から構成されます。表示部は一般的に市販されている液晶ディスプレイを複数台利用し長方形になるように配置する一方で、複数台の計算機群 (クラスタシステム) によって駆動部を構成しています。駆動部のクラスタシステムが表示部を制御する仕組みとなっています。

下記の図9は大阪大学で導入した4 x 5のタイルドディスプレイの表示部と駆動部を示しています。大阪大学で導入したタイルドディスプレイでは、駆動部の1台の計算機で2つのディスプレイを制御する構成となっています。そのため、駆動部の計算機は全部で10

台となっています。図では合計11台ありますが、そのうち1台をクライアント用計算機として別の用途で利用することを想定していることに起因しています。



(表示部)



(駆動部)

図9 大阪大学サイバーメディアセンターに導入されているタイルドディスプレイ概観

図10は、本論文執筆時点で構築中のタイルドディスプレイを撮影したものです。図では、4x5面のタイルドディスプレイ上で4x4面、すなわち16台の液晶モニターを利用したコンピュータグラフィック（写真では画像）が稼動していることが示されています。大阪大学で構築中のタイルドディスプレイの設定作業が完了すると、最大で2600万画素（4096x6400画素）級の超高解像度な画像を見ることが可能になります。

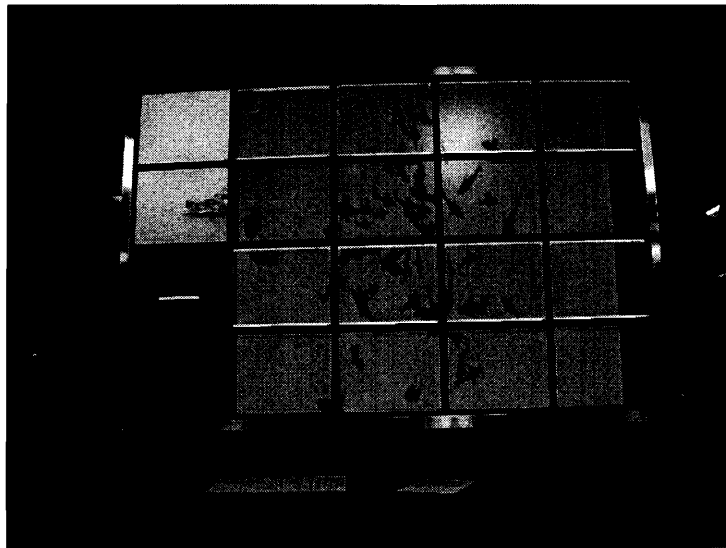


図10 構築作業中のタイルディスプレイ

さらに、このタイルディスプレイでは、特筆すべき特徴を有しています。図11を用いて説明します。このタイルディスプレイは単に高解像度の画像を表示するだけの機能ではなく、複数の研究機関・大学を接続し各研究機関や大学で同時に同一の画面を共有することができるという機能を有しています。つまり、大学Aで表示した画面イメージが同時に遠隔地の研究機関Bでも表示され、反対に研究機関Bで表示している画像が大学Aでも同時にみることができる。すなわち、互いに分散した研究機関や大学で仮想的な共有環境を構築することが可能になります。

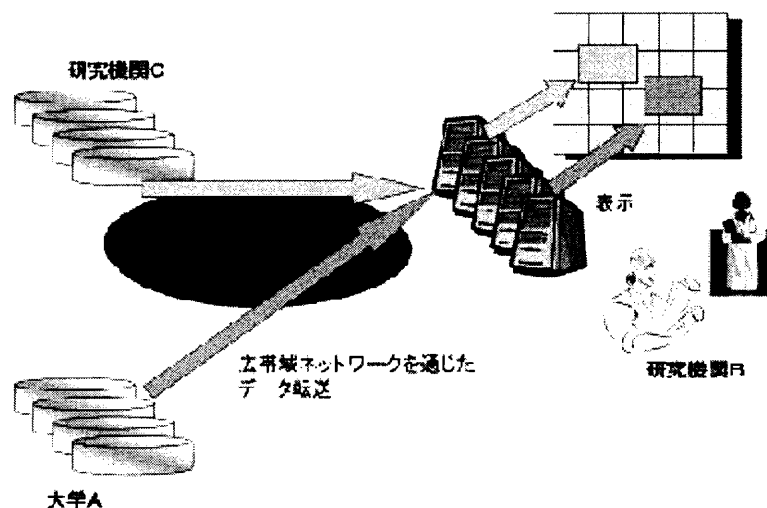


図11 タイルディスプレイによる仮想的な共有環境 (出展)

このように、タイルディスプレイはただ単に高解像度な画像の表示だけでなく、最

先端の情報技術を応用するグラフィックグリッドを実現する計算資源といえます。実際、大阪大学で構築中のタイルディスプレイの実現には、イリノイ大学電気画像研究所 (Electronic Visualization Laboratory: EVL)^[18]で研究開発されているソフトウェア SAGE(Scalable Adaptive Graphics Environment)を導入していますが、SAGE はただ単に高解像度な画像を表示するだけとしてではなく、可視化のための分散計算アーキテクチャを有するソフトウェアであると開発者らは定義しています^[19]。

以下では、大阪大学がこの計算資源を利用して今後どのようなチャレンジをしていくかについて紹介したいと思います。

3.3.3 今後の大阪大学のチャレンジ

大阪大学サイバーメディアセンターでは、米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD)と数年来共同研究を推進してきました。なかでも、UCSD の NCMIR (National Center for Microscope Imaging Research)^[20]の所長である Mark Ellisman 教授と本センターが推進する、大阪大学超高压電子顕微鏡センターの電子顕微鏡を利用した共同研究は長い歴史をもっています。

Mark Ellisman 教授は、前述した“マルチスケール“研究を次世代の研究開発に必要な不可欠かつ重要性の高いものにとらえ、早くからグリッドなどの情報技術を駆使した研究開発を推進していますが、タイルディスプレイを用いた研究についても例外ではありません。Mark Ellisman 教授は、大規模なタイルディスプレイを構築し、神経細胞のミクロからマクロな画像をタイルディスプレイ上で同時に表示し、それぞれの領域における研究者らがたとえ離れた場所にいてもみるのことができるような、マルチスケール研究をささえる研究環境を早くから実現しようとしています。BIRN プロジェクト^[21]、OptiPuter プロジェクト^[22]といった米国でも屈指の研究プロジェクトが UCSD の研究者らを中心として推進されていますが、これらはそのような着眼で早くから研究開発に着手してきた結果といえます。

大阪大学では、このような“マルチスケール“研究の重要性にいち早く共鳴し、**tiled display**を利用したマルチスケールな研究開発を支援する情報技術の研究開発に取り組みを開始しています。このような“マルチスケール“研究を支える情報技術の研究は、まだまだ未熟で数多くの研究開発要素が残されています。例えば、ここで紹介したタイルディスプレイで広範囲な画面を最大限に利用するには、SAGE の提供するライブラリや API を利用した研究開発が必要であるため、現在タイルディスプレイで稼動するソフトウェアの数は多くありません。そのため、バイオ研究者などのユーザを対象とした SAGE 上で稼動するミドルウェアやソフトウェアの開発は今後必須となっています。

また、先にネットワークを利用し高解像度な画像や映像が複数研究機関で表示する機能を有していると記しましたが、タイルディスプレイの研究開発の背景にはフォトニック

ネットワークなどの次世代ネットワークの利用が前提としてあります。フォトニックネットワークでは、伝送、多重化、経路制御等の機能をすべて光技術だけで行うことにより、大容量ネットワーク伝送が実現されますが、このような最先端のネットワークを効率に利用するためには理論面および実践面からの研究開発が必要となります。

大阪大学サイバーメディアセンターでは、このように先進的な技術動向にいち早く呼応するとともに、つねに新しく有用な情報技術の研究開発に挑戦していきたいと考えています。そのような観点からも、PRAGMAなどの諸外国の研究機関や大学の研究者や科学者と議論を行い、情報技術と科学の進展に貢献していきたいと考えています。

4. 融合研究推進の考察 —融合研究の問題と課題—

3節では、バイオサイエンスと情報科学（コンピュータサイエンス）の融合プロジェクトであるバイオグリッドプロジェクトについてまとめました。バイオグリッドプロジェクトでは、上述の通り関西圏のバイオ関連研究に携わる研究者や技術者が産学問わず集い、情報技術あるいはバイオサイエンスの進展を願い研究開発を推進するプロジェクトを推進してきました。当初は、バイオサイエンスと情報科学に携わる研究者間で研究開発の方向性がなかなか一致しないということが多々ありました。その理由として、本プロジェクトで共通のキーワードとなるグリッド技術に対して、バイオサイエンスに携わる研究者と情報科学研究者に携わる研究者の考えるものかなりの相違があったことが挙げられます。例えば、当初バイオ研究者はグリッドは大規模計算を簡単にできる最先端技術という認識をもつ一方で、情報科学分野の研究者は実際に使える技術にするためにはかなり多くの課題がある技術と考えていました。

また、別の理由として、バイオ研究者と情報研究者が互いの研究分野の研究者に求める役割や期待が大きく異なっていたことが上げられます。バイオ研究者は、情報の研究者や技術者にはバイオ研究者の立場に立ち、有用なツールやソフトウェアを早期に開発してほしいと考える一方で、情報の研究者は真に有用なツールやソフトウェアを開発するには時間をかけた研究が必要と考えるような考え方の相違がありました。このため、なかなか共同で研究開発を進めることができなかつたということもありました。さらに、お互いの分野での問題意識をなかなか共有できなかつたことも、バイオと情報分野の融合研究をなかなかうまくスタートできないという問題もありました。

しかし、これらの問題は、バイオグリッド研究会やバイオグリッド合宿といった定期的集い議論を重ねていくことにより、バイオと情報分野の研究者が互いの問題意識を理解しお互いに歩み寄ることができるようになり、解決されました。本論文執筆時点においてバイオグリッドプロジェクトは最終年度となっていますが、バイオと情報の研究者らによる新たな研究へむけた動きも始まっており、現在ではホットな研究領域となっています。

バイオグリッドプロジェクトの経験から、あたらしい研究領域を生み出そうとする融合

研究では、どのような分野においてもこのような価値観の衝突による問題が発生するとわれわれは考えています。ソシオネットワーク戦略のキーであるコンピュータサイエンスと社会科学の融合においても、このような価値観の衝突による問題は間違いなく生じるとわれわれは考えています。しかし、互いの分野の研究者が集い議論を行っていくという地道な活動を行うことで初めて新しい融合研究領域を切り開けるとわれわれは信じています。筆者らはこのような経験と観点から、今後も情報科学と実際科学の融合研究領域において研究開発を行っていきたいと考えています。

5. おわりに

本論文では、大阪大学で推進中のバイオグリッドプロジェクトを振り返り、そのプロジェクト推進上の背景、目的、成果について説明するとともに、融合研究推進上の問題および課題について考察しました。今後コンピュータサイエンスと科学の融合領域における研究はますますその重要性を増していくと考えられています。

筆者らはソシオネットワーク戦略研究センターの研究メンバーとして、バイオグリッドでの新しい融合領域における経験やノウハウをもとに、ソシオネットワーク戦略研究センターとともに社会科学とコンピュータサイエンスの新しい領域にチャレンジしていきたいと考えています。

参考文献

- [1] バイオグリッドプロジェクト, <http://www.biogrid.jp>.
- [2] Ian Foster, Carl Kesselman, 2003, 『Grid2』, Morgan Kaufmann Pub..
- [3] Globus Alliance (グローバスアライアンス), <http://www.globus.org>.
- [4] Glogal Grid Forum, <http://www.gridforum.org>.
- [5] Karl Czajkowski, Donald F Ferguson, Ian Foster, Jeffrey Frey, Steve Graham, Igor Sedukhin, David Snelling, and Steve Tuecke, William Vambennepe, 2004, “The WS-Resource Framework (whitepaper)”
- [6] Karl Czajkowski, Donald F Ferguson, Ian Foster, Jeffrey Frey, Steve Graham, Tom Maguire, David Snelling and Steve Tuecke, 2004, “From Open Grid Services Infrastructure to WS-Resource Framework: Refactoring & Evolution (whitepaper)”
- [7] Steve Graham, Peter Niblett, Dave Chappell, Amy Lewis, Nataraj Nagaratnam, Jay Parikh, Akamai Technologies, Sanjay Patil, Shivajee Samdarshi, Igor Sedukhin, David Snelling, Steve Tuecke, William Vambenepe, and Bill Weihl, 2004, “Publish-Subscribe Notification for Web Services”.
- [8] Randy Butler, Von Welch, Douglas Engert, Ian Foster, Steven Tuecke, John Volmer,

- and Carl Kesselman, 2000, "A National-Scale Authentication Infrastructure", IEEE Computer, Vol.33, No.12: pp. 60-66.
- [9] Von Welch, Frank Siebenlist, Ian Foster, John Bresnahan, Karl Czajkowski, Jarek Gawor, Carl Kesselman, Sam Meder, Laura Peralman, and Steven Tuecke, 2003, "Security for Grid Services", Proceedings of telfth International Symposium on High-performance Distributed Computing (HPDC-12), IEEE Press.
- [10]Karl Czajkowski, Ian Foster, Nicholas Karonis, Carl Kesselman, Stuart Martin, Warren Smith, and Steven Tuecke, "A Resource Management Architecture for Metacomputing Systems", 1998, Proceedings of IPPS/SPDP '98 Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing: pp.62-82.
- [11] National Research Grid Initiative(NAREGI:国立情報学研究所グリッド研究開発推進拠点), <http://www.naregi.org/>.
- [12] Pacific Rim Applications and Grid Middleware Assembly (PRAGMA), <http://www.pragma-grid.net/>.
- [13] Rajkumar Buyya, David Abramson, and Jonathan Giddy, "Nimrod/G: An Architecture for a Resource Management and Scheduling System in a Global Computational Grid", 2000, Proceedings of HPC Asia 2000: pp. 283-289.
- [14] James Frey, Todd Tannenbaum, Ian Foster, Miron Livny, and Steven Tuecke, 2002, "Condor-G: A Computation Management Agent for Multi-Institutional Grids", Journal of Cluster Computing, Vol. 5: pp.237-246.
- [15] Maeieres, David, 2000, "Self-certifying File System", Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston.
- [16] 武田 伸悟, 伊達 進, 下條 真司, 2004, "GSI-SFS: グリッドのためのシングルサインオン機能を有するセキュアファイルシステム", 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム, Vol. 45, No. 4: pp. 223-233.
- [17] Yoshiyuki Kido, Susumu Date, Shingo Takeda, Shoji Hatano, Juncai Ma, Shinji Shimojo, and Hideo Matsuda, 2004, "Architecture of a Grid-enabled research platform with location-transparency for bioinformatics", Genome Informatics, Vol. 15, No. 2: pp. 3- 12.
- [18] Electronic Visualization Laboratory: EVL <http://www.evl.uic.edu>.
- [19] Scalable Adaptive Graphics Environment, <http://www.evl.uic.edu/cavern/sage/index.php>
- [20] The National Center for Microscopy and Imaging Research (NCMIR), <http://ncmir.ucsd.edu/>.
- [21] BIRN, <http://www.nbirn.net/>.
- [22] OptiPuter Project, <http://www.optiputer.net/>.