

## ジョブ特性を考慮した優先制御機構を有する 脳機能解析システムの設計と構築

市川 昊平<sup>†</sup> 伊達 進<sup>†</sup> 水野 (松本) 由子<sup>‡</sup> 下條 真司<sup>§</sup>

科学データ計測機器の高度化は、空間的かつ時間的に高精度な科学データの取得を可能にし、その傾向は今後も続くことが予想される。科学計測機器より計測される膨大な科学データをより高速かつ効率的に解析する計算基盤として、グリッドへの期待が非常に高まっている。本論文は、高度先進医療機器である脳磁計から大量に取得される脳機能データをグリッド技術を用いて効率的に解析できる脳機能解析システムについて論じる。本システムの最大の特徴は、広大な脳機能解析空間に局在するユーザ関心領域が優先的に解析されるフレームワークを有している点である。本論文では、本システムの設計と構築技法について示すとともに、本システムの有効性、有用性を定性的に評価する。

## Design and Implementation of an Analysis System for Brain Function with a Priority-based Job-Sequence Control Mechanism

Kohei Ichikawa<sup>†</sup> Susumu Date<sup>†</sup> Yuko Mizuno-Matsumoto<sup>‡</sup> Shinji Shimojo<sup>§</sup>

Scientific data acquired from advanced measurement devices have increased in amount due to the recent development of measurement technologies. To efficiently analyze such data within a realistic time, the Grid is seen as an important computing platform for advancement of science. This paper discusses a Grid-enabled analysis system for brain function. The system enables medical doctors and scientists to analyze a large amount of data acquired from magnetoencephalography, a highly-sophisticated medical device with high efficiency. The feature of this system is in a job-sequence control mechanism based on user's region of interest for data. In this paper, we describe the design and implementation of the system and then evaluate the system qualitatively.

### 1 研究の背景と目的

脳科学は医療および学術研究の両面において 21 世紀の科学として重要な役割を担うと考えられている。このことは、高齢化社会に伴う脳疾患の増加や、脳機能の解明によってもたらされる新たな技術に対する期待などからも説明できる。実際、fMRI (functional Magnetic Resonance Imaging) や MEG (Magnetoencephalography) といった脳機能の観察に用いられる科学計測機器は高度化し、高精度な測定が可能となってきている。その結果、近年取得される脳機能デー

タの量は膨大化しつつある。

高精度な測定装置から得られる膨大な量のデータを高効率かつ十分に解析するためには、大規模な計算機環境が必要不可欠となる。実際、このような傾向はほとんどの科学分野で共通にみられ、そのような大規模計算機環境を高度な科学計測機器と連結し、ネットワーク上に仮想研究環境の実現を目的とした研究開発が世界各国で現在推進されている。しかし、脳科学分野においては、実際に医療および学術研究の両面に対して大規模な計算機環境を利用した脳研究は稀である。脳科学分野だけでなく、他の医療分野においても医療データ解析用ソフトウェアのほとんどが単一プロセッサベースで開発されているのが現状である。

取得されるデータ量の膨大化に伴い、脳科学分野においても計算パフォーマンスに対する IT への期待が高まっている。特に、インターネット上の遊休資

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>‡</sup> 大阪城南女子短期大学幼児教育科  
Advanced Diploma in Child Education, Osaka Jonan Women's Junior College

<sup>§</sup> 大阪大学サイバーメディアセンター  
Cybermedia Center, Osaka University

源の動的な集約を実現するグリッドコンピューティングへの期待は著しい。脳科学においても、高度な脳機能測定装置と解析に用いる大規模な計算機環境を組織の枠を超えて統合する脳科学のためのグリッド環境がいま求められている。

そのような観点から、本研究では脳科学の発展に貢献することを目的とし、脳機能測定装置から取得されるデータを大規模な計算機環境で高効率に解析することを可能にするシステムをグリッド環境上で構築する。地理的に離れた計測機器とそれらから取得される科学データを解析する計算機環境をシームレスに結合し、脳科学研究の効率化を図るシステムは、脳科学の発展に対して必要不可欠かつ重要な役割を果たすことができると考えられる。

## 2 脳機能解析とその問題点

本研究で対象とする脳機能解析は、MEG から得られる脳機能データに対し時間周波数解析を適用するものである。MEG は脳内の神経細胞の活動によって 2 次的に生じる磁場の変化をとらえる装置である。磁場の変化はヘルメット状に配置された多数の SQUID ( Superconducting Quantum Interference Device ) センサによって測定される。非侵襲かつ高精度な測定が MEG の最大の特徴である。

MEG から得られた信号に対し、本研究では時間周波数解析の一種であるウェーブレット解析とウェーブレット相互相関解析を適用する [1]。ウェーブレット解析によって信号は時間-周波数空間上に写像される。ウェーブレット解析は主に信号のパターン認識などに用いられる手法であり、本研究では刺激に対する脳の反応のパターンや、脳疾患などによる異常波を認識する用途で用いる。また、ウェーブレット解析によって得られた個々の解析結果に対し、それらの相互相関を求めるウェーブレット相互相関解析を行うことによって、脳内を伝播する神経細胞の発火を追跡することが可能となる。任意の 2 センサのウェーブレット解析の結果の相互相関を取ることによって、あるセンサによって捕らえられた周波数反応が次にどのセンサ方面へ移動したかといったことや、その時間差を調べることができる。ウェーブレット相互相関解析の本特性は、非定常特性をもつ脳機能データの解析に対して優位なものであり、そ

のために、脳機能データ解析への応用への期待が非常に高いものとなっている。

しかし、本手法を大量の脳機能データへ適用する際の最大の問題点は計算パフォーマンスとなる。近年の計測関連技術の発展により、MEG のセンサ数は増加傾向にあり、またデータ取得のサンプリング周波数も 1 KHz と高精度である。このことは MEG によるデータ量が増加傾向にあることを示している。さらに、この計算パフォーマンスの問題は本手法の計算量からも説明できる。ウェーブレット解析に要する計算時間はセンサ数やサンプリング周波数に対して比例増加するが、ウェーブレット相互相関解析は MEG センサの組み合わせの問題のため、その計算時間は MEG センサ数の 2 乗に比例する。データ精度の向上とその結果としてのデータ量増加と、近年の MEG センサ数の増加は、本手法の脳機能解析への応用を困難にしている。この膨大な量のデータ解析を終えるには相当の時間が必要となるが、その解析と平行して医師や研究者は原信号データを見ることは可能である。てんかん性の波形や刺激に対する反応は原信号を見るだけでもある程度その領域を特定可能であり、そのようなユーザの関心が高い領域に関しては即座に解析を行いたいという要求がある。すなわち、構築する脳機能解析システムにはユーザの関心が高い領域に関しては他の領域よりも優先的に解析を行い、かつ解析結果もまた他の低い優先度領域と区別し優先的に取得可能とする機能が要求される。

また、地理的に分散する資源上での効率的な解析の実現は、グリッド環境での脳機能解析システム実現の際の課題である。解析の手順は必ず、どのデータに対しどのようなパラメータで解析を行うのかという解析の要求を出すフェーズ、そして実際に解析を計算機資源上で行うフェーズ、最後に出力された結果を閲覧するフェーズからなり、これらの一連の流れがスムーズに結合されている必要がある。現状では、解析要求と解析、解析結果の閲覧はスムーズに結びついておらず、解析終了とともに手動で解析結果取得のためにリモートホストにアクセスするという手段が講じられているのが一般的である。情報技術の深い専門知識を持たない医師や研究者らにこのような煩雑な作業を強いることは、医師や研究者

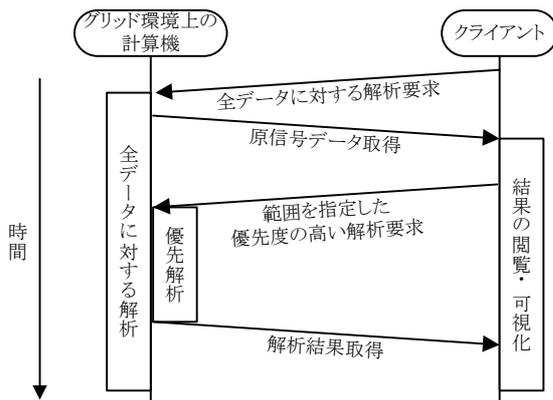


図 1: 本システムにおける解析手順の例

らの研究開発推進のうえで大きな障壁となる。

### 3 アプローチ

#### 3.1 解析処理の分散

ウェブレット解析、ウェブレット相互相関解析を分散環境で行う場合、センサごとや時間ごとにデータを分割し、分散処理させる方法が考えられる。ウェブレット解析、ウェブレット相互相関解析はともにセンサ間や時間の分割領域間において依存関係はなく、並列に動作するプロセス間で同期処理や通信を行う必要はないため、SPMD (Single Program Multiple Data) 型の分散化が可能である。全てのデータに対する解析を細分化し、多数の計算機に対して分散させることによって効率よく解析を行うことができる。

#### 3.2 優先度に従ったジョブ実行順制御

本システムでは図 1 のように全データに対する解析を行っている間でも関心領域を指定した優先度の高い解析も受け付け、優先度の高い解析の方が可能な限り早く解析が終了するように制御を行う。

本研究では、ユーザの要求に従いユーザが関心を示す領域を優先的に解析する仕組みを実現するため、計算機資源を実際に管理するローカスケジューラに対し、ユーザがジョブ投入時に付与する優先度に応じた実行順制御を行うように指示をすることによって実現する。また、解析結果取得時においても、他の多数の解析結果の中から優先度の高いジョブの解析結果から順に取得できる仕組みを提供するため、解析結果の情報を管理するモジュールを設計し、構築する。これらの機能によって、解析の要求から、実際

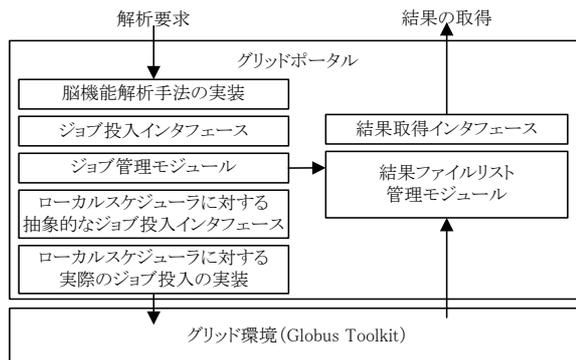


図 2: ジョブの実行順制御を実現する仕組み

の解析、そして解析結果の取得までの解析処理の一連の流れをユーザ要求の優先度に基づき処理することが可能になる。このことは、本システムが、ユーザの求める解析要求の配送を実現するという点で、高い QoS (Quality Of Service) を提供可能であることを意味している。

#### 3.3 グリッドポータル

本システムではグリッド環境に対する認証、ジョブの投入、そして結果の取得までの一連の処理をスムーズに結合するために、Web アプリケーションのロジックとしてこれらの処理を組み込むという手法を選択した。これにより、ユーザはユーザビリティに富んだ Web インタフェースを通じてグリッド環境に解析要求を出し、結果の取得も Web インタフェースを通じて行うことができる。すなわち、脳機能解析のためのグリッド環境に対するグリッドポータルとして本システムの構築を行った。先に述べた優先度に従ったジョブの投入や、解析結果の管理などは全て本グリッドポータル内部で実装され、解析の各フェーズはシームレスに結合することになる。ユーザは本システムが提供する Web インタフェースを介して透過的にグリッド環境上で実現されている脳機能解析システムに対してアクセス可能である。

## 4 設計

#### 4.1 ジョブ実行順制御の設計

図 2 はユーザ要求に基づきジョブの実行順制御を行う仕組みを示している。解析ジョブは優先度を付与された状態で投入される。優先度やそのジョブによる生成結果がどこに生成されるかといった情報はジョブ管理モジュールによって管理される。各計算

機上における解析ジョブのプロセスの生成は Globus Toolkit (以下、Globus) の GRAM ( Globus Resource Allocation Manager ) [2] を用いて各計算機資源を管理するローカスケジューラに対して指示することによって行う。この時、解析要求時に付加された優先度に従ったスケジューリングを行うように各ローカスケジューラに応じた適切なパラメータを用いて指示する必要がある。しかし、グリッド環境で用いられているローカスケジューラは種類や設定などの相違が存在する。GRAM によってローカスケジューラの相違はある程度隠蔽されるが、優先度に従ったジョブ実行順制御を抽象化する仕組みはない。そこで、本システムでは優先度に従ったジョブの実行順制御を抽象化するため、ローカスケジューラを抽象化するインターフェースの定義を行った。このインターフェースに従った形で各々のローカスケジューラに応じた優先度の解釈を行い、ジョブの投入を行うことによって、優先度に従ったジョブ実行順制御を実現する。このインターフェースによって、本システムは特定のローカスケジューラに依存することなくポータビリティを確保している。

ジョブの動作状態も GRAM を通じて知ることができ、ジョブ管理モジュールがジョブの動作状態を管理している。ジョブの終了を検知すると、ジョブ管理モジュールはジョブの投入要求の時に付加された優先度や生成結果に関する情報を基に結果を取得するために利用される情報を自動的に生成する。ユーザはこの情報を閲覧することによって、あるジョブの生成結果がどこにあるのかを知ることができる。ジョブとその生成結果が関連づけられて管理されているため、ユーザがあるジョブの生成結果を取得する際にはスムーズにその生成結果の保存されている場所にアクセスすることが可能である。

また、これら結果を取得するために利用される情報はジョブの数だけ生成されるため、多量のジョブを分散処理すると、この情報も多量に生成されることになる。測定データ全てに対するバッチ的な分散処理結果ならば後から全ての生成結果を一括で取得すれば良いが、関心領域を指定して優先的に解析を行った領域に関しては可能な限り早く閲覧したいという理由から、解析結果も他のバッチ的なジョブによる生成結果とは区別して提供する必要がある。本シ

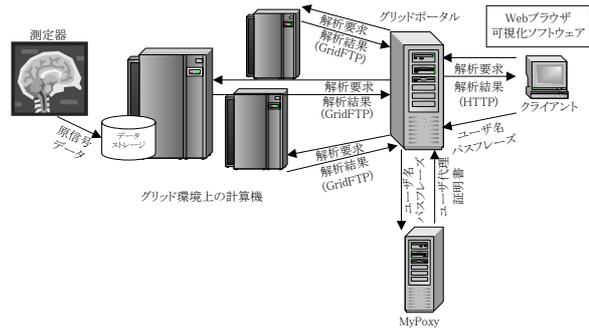


図 3: 脳機能解析支援システムの概要

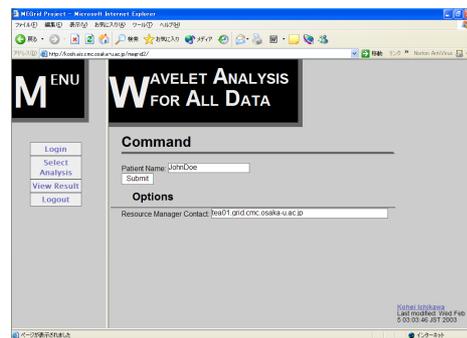


図 4: Web インターフェースの例

ステムでは、結果を取得するために利用される情報のリストをジョブ投入時に付与された優先度順にソートして管理することによって、優先度の高いジョブの結果から優先的に取得することを可能にしている。

#### 4.2 グリッドポータル設計

図 3 は本研究で構築した脳機能解析支援システムの概要を示す。解析要求や解析結果の取得は全てグリッドポータルを通じて行われる。図 4 は本システムのグリッドポータルが提供する Web インターフェースの例である。このようなインターフェースを用いて解析要求や解析結果の取得を行う。

グリッド環境の資源を使用する際に必要な認証もグリッドポータルを通して行われ、グリッドポータル上でシングルサインオンが実現される。本システムではグリッド環境を構成するミドルウェアとして Globus を用いているため、認証には GSI ( Grid Security Infrastructure ) [3] を用いる。GSI の認証に必要なユーザ証明書は代理証明書のレポジトリサーバとして働く MyProxy [4] サーバに預けておき、必要ときにユーザ名とパスワードを用いて代理証明書を取り出すことによって認証を実現している。

このように証明書を預けておく第3サーバを用意しておくことによって、ユーザはどのような環境においてもユーザ名とパスフレーズのみで証明書を取得することが可能となる。

グリッドポータルアプリケーションとしてのロジック部分はJava Servletによって記述している。グリッド環境の計算機資源へのジョブの投入は、前述のジョブ管理モジュールが提供するジョブ投入機能を用いて行われる。ジョブ管理モジュールによってジョブの終了時には生成結果がどこにどのような名前のファイルで出力されているかといった情報が生成されるので、その情報を基にGridFTP [5]を用いて取得することが可能である。ただし、クライアント側はグリッドポータルにHTTPでアクセスしてきているため、図3に示すようにグリッドポータルとグリッド環境間はGridFTPで通信を行うが、グリッドポータルがその結果をクライアントに返すときはHTTPのレスポンスとして提供している。

## 5 脳機能解析支援システムの実装

本システムは2つのクラスタを用いてプロトタイプ実装を行った。2つのクラスタにはローカルスケジューラとしてPBS (Portable Batch System) [6]を用いた。PBSはその名の通りバッチ処理に適したスケジューラであり、キューを用いたジョブ制御機能を有している。ジョブの特性に応じたキューのカスタマイズが可能であり、スケジューリングポリシーも独自にカスタマイズできるのが特徴である。

本システムでは複数の優先度の異なるキューをPBSの設定によって作成した。PBSのデフォルトの動作では、管理する計算機資源に空きがある場合は、常に優先度の高いキューに並んでいるジョブから資源の割り当てを行う。本システムでは、ジョブの実行順制御はジョブを投入するキューを切り替えることによって実現している。実際には4.1節で説明したローカルスケジューラを抽象化するインタフェースに従い、優先度の値に応じてジョブを投入するキューを切り替える実装を用意した。そのため、アプリケーションロジックの実装の部分ではPBSに依存した実装は現れない。

アプリケーションのロジックとしては、MEGにより測定されたデータ全体に対する解析はバッチ的な

要素があるため、細分化するとともに多数のジョブを優先度を低く設定して投入し、その一方で関心の高いデータ範囲を指定して解析要求された領域は優先度を高く設定してジョブを投入する。本実装により、データ全体に対するバッチ的なジョブは優先度が低いキューに並び、範囲指定をして解析要求された領域のジョブは優先度が高いキューに並ぶことになる。PBS内では計算機資源に空きがある場合は常に優先度が高いキューのジョブが選択され、実行されるので、関心の高い領域の解析結果は可能な限り早く処理されることになる。

## 6 システム評価

本システムは高精度な測定装置であるMEGと、大規模な計算機資源を結合させ、測定装置から得られる大量のデータを効率よく解析できる研究環境をネットワーク上に仮想的に実現している。本システムはグリッドポータルとして構築されており、解析の要求と解析、そして結果の取得までの一連の流れをシームレスに結合する。さらに、ユーザビリティに富んだWebインタフェースの背後にグリッド環境に対する複雑な操作を隠蔽し、地理的に分散している環境をユーザに意識させることなく、透過的なアクセス手段を提供することに成功した。また、ジョブの実行順制御が働くことによって、バッチ的に投入した全ての解析の終了をただひたすら待ち続けるということなく、関心の高い領域に関しては可能な限り早く解析結果を取得したいというユーザ要求が実現される。

本システムで実現されるグリッド環境上の仮想的な脳機能解析の研究環境は、従来の脳機能解析の効率を飛躍的に向上させることにつながることが期待される。組織の枠を超えて測定装置や計算機資源を共有することは一組織では不可能であった大規模な研究を実現する可能性を示している。

本システムではジョブの実行順制御機能を有し、ジョブの投入から結果の取得までの一連の流れを管理する仕組みを構築し、それを用いて脳機能解析アプリケーションの実装を行った。図2に示すように、脳機能解析アプリケーションの実装部分とジョブの実行順制御やジョブ管理、結果管理機能は完全に独立している。このジョブ実行順制御やジョブ管理、

結果管理機能の部分は一種のフレームワークとして働いている。ジョブの投入とその結果情報の関連づけを行うという非常にシンプルな設計だが、このようなフレームワークは他のアプリケーションでも共通して必要とされる機能であると考えられる。シンプルな設計のため自由度は高く、このフレームワークに従って構築可能なアプリケーションは数多いと考えられる。また、本研究では脳機能解析としてウェーブレット解析とウェーブレット相互相関解析のみを実装したが、このフレームワークに従って作成すれば他の解析手法も実装可能とわれわれは考えている。

## 7 まとめと今後の課題

本研究では、地理的に離れた測定装置とそれから得られるデータを解析する計算機環境をシームレスに結合し、脳機能解析の効率化を実現するシステムの構築を行った。解析処理は多数の計算機に分散して行われるが、ユーザはそれを意識することなく、解析の要求を出し、解析結果を取得することが可能である。これはグリッド環境の複雑さを隠蔽するグリッドポータルとして実装された本システムが解析要求を受け、実際に解析プロセスを走らせ、結果を生成するまでの各フェーズを一元的に管理し、統合した環境を提供しているからである。また、このシステムはユーザ要求に従ってジョブの実行順制御を行う機能を有しており、ユーザに高いQoSを提供している。

本システムによって、脳機能解析の効率の向上が期待できる。また、ジョブ実行順制御や解析プロセスの生成を行う部分は脳機能解析アプリケーションの具体的な実装とは分離されており、この部分は他分野のアプリケーションの実装にも応用可能である。

今後の課題としては本システムが提供するウェーブレット解析などのサービスに対し OGSA のインタフェースを取り入れ、広く公開できるサービスの提供を行う必要があると考える。他のシステムの一部として本システムが提供するサービスが使用可能になることによって、より高次の応用アプリケーションの構築の助けとなると考えられる。そのためには入出力データの仕様を厳格に定めたりといった課題がある。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金特定領域研究(C)「Grid技術を適応した新しい研究手法とデータ管理技術の研究」(13224059)の助成を受けて行われた。また、文部科学省科学技術振興費主要5分野の研究開発委託事業の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」の一環として実施された研究成果の一部である。

## 参考文献

- [1] Y. Mizuno-Matsumoto, S. Tamura, Y. Sato, R. A. Zoroffi, T. Yoshimine, A. Kato, M. Taniguchi, et al. Propagating process of epileptiform discharges using wavelet-crosscorrelation analysis in meg. In *Brain Topogra. Today*, pp. 782–785. Tohoku University Press, 1999.
- [2] K. Czajkowski, I. Foster, N. Karonis, C. Kesselman, S. Martin, W. Smith, and S. Tuecke. A resource management architecture for metacomputing systems. In *The 4th Workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing*, pp. 62–82. Springer-Verlag LNCS 1459, 1998.
- [3] R. Butler, D. Engert, I. Foster, C. Kesselman, S. Tuecke, J. Volmer, and V. Welch. A national-scale authentication infrastructure. *IEEE Computer*, Vol. 33, No. 12, pp. 60–66, 2000.
- [4] J. Novotny, S. Tuecke, and V. Welch. An online credential repository for the grid: Myproxy. In *Proceedings of the Tenth International Symposium on High Performance Distributed Computing (HPDC-10)*. IEEE Press, 2001.
- [5] W. Allcock, J. Bester, J. Bresnahan, A. Chervenak, L. Liming, S. Meder, and S. Tuecke. Gridftp protocol specification. *GGF GridFTP Working Group Document*, September 2002.
- [6] A. Bayucan, R. L. Henderson, J. P. Jones, C. Lesiak, B. Mann, B. Nitzberg, T. Proett, and J. Utley. *Portable Batch System Administrator Guide*. Veridian Systems, August 2000.