

Grid Datafarm における天文学データ解析ツールの性能評価

山本直孝[†] 建部修見[†] 関口智嗣[†]

観測的天文学の分野では観測装置の大型化が進んでおり、得られる観測データの量が增大している。個人の研究者が得たデータを解析する場合には数台の計算機があれば十分であるが、アーカイブされている全てのデータを解析するためには大規模ストレージおよび分散処理などをサポートしたミドルウェアが必要である。そこで、ペタバイトスケールインテンシブコンピューティングのためのアーキテクチャである Grid Datafarm を用いた解析環境の構築を試みた。Grid Datafarm の参照実装である Gfarm を用いてデータ解析ツールを実行し、大規模な分散処理環境下での動作を確認した。これにより、観測データの一次処理や観測データからの天体検出を効率的に並列分散処理することができ、59 ノードを用いた解析ツールの実行によって 1.5 GB/s のトータル I/O 性能が得られた。さらに、FITS ファイルブラウザを動作させたことにより天文学データ解析のための基礎を整えることが出来た。一方で、メタデータサーバへのアクセスの集中によりスケーラビリティが保たれないという問題が生じ、より大規模な環境で解析環境を実現するためには改善する必要があることが明らかとなった。

Performance Evaluation of Astronomical Data Analysis Tools on Grid Datafarm Architecture

NAOTAKA YAMAMOTO,[†] OSAMU TATEBE[†]
and SATOSHI SEKIGUCHI[†]

Aiming at a comprehensive study of archival data of astronomical observatories that has a possibility of new science and new knowledge in the observational astronomical field, we constructed a large-scale parallel and distributed data analysis environment using a Gfarm reference implementation of the Grid Datafarm architecture. A set of data analysis tools including data reduction tools and a source extractor tool, were successfully executed in parallel on the Gfarm parallel file system, and the parallel I/O operations has achieved data transfer rate of 1.5 GB/s using 59 cluster nodes. A FITS-file browser was also successfully executed on the file system, which gave a fundamental environment of astronomical data analysis. On the other hand, there is a scalability problem due to the concentration of filesytem metadata accesses, which needs to be improved to realize much large-scale data analysis.

1. はじめに

天文学の研究は、観測によるものと理論的研究によるものとで大きく二分される。特に、観測的天文学においては大型 CCD の開発などにより観測装置から出力されるデータが年々巨大化している。日本の観測所においても文部科学省国立天文台ハワイ観測所に世界最大級のすばる望遠鏡³⁾が完成し日々データが取得されている。すばる主焦点カメラ⁴⁾(Suprime-Cam)を例にとると 1999 年 1 月の観測開始から 2001 年 12 月の間に観測された 3TB 弱のデータが研究者に公開されている。すばる望遠鏡は複数の観測装置を持つため、実際にはその数倍のデータが取得され、18 カ月の観測者占有期間が過ぎたデータが SMOKA^{6),15)}を通し

て順次公開されている。

これまでの観測的天文学の分野では自ら観測し、取得したせいぜい数十から数百 GB のデータを対象としたものがほとんどであった。これは、研究者がある特定の興味を持っている天体のみを対象とした研究である。すばる望遠鏡を含む大型望遠鏡で取得されたデータはそれぞれアーカイブされ、世界中で公開されている^{5),6),8),10)}。アーカイブされているデータを全て一括に解析することは、そのデータ量から 1 台の計算機で処理できるものではない。大容量かつ、多数のファイルを管理し分散処理を行うことが可能なミドルウェアが必要とされている。

アーカイブデータを一括して処理することにより新たな天文学的知見が得られる可能性はいくつかあり、既存のカタログを超えたカタログ作成や新天体の検出が考えられる。アーカイブデータから天体を総あたりで抽出することによりこれまでになく暗い天体まで

[†] 産業技術総合研究所グリッド研究センター
Grid Technology Research Center, AIST

を含む広範囲の星や銀河などのカタログの作成が可能である。カタログ作成のためのサーベイ観測はいつか行われているが、全天をサーベイするために明るい天体のみをターゲットにしている。アーカイブデータはより暗い天体の情報を保持しているためこれらを一括処理することにより全天には及ばないが、これまでにない暗い天体をカタログに含めることが出来る。一方、アーカイブされているデータは観測者がある意図を持って取得したものであるが、観測者が意図しない新しい天体が写っていることは頻繁に起こる。特に太陽系内天体はその位置が移動してしまうため画像の重ね合わせ処理によってその姿は合成画像から消えてしまうが、これらの移動天体を検出することにより、多くの太陽系内小天体が発見されることが期待される。

現在公開されている Suprime-Cam のデータ (約 3TB) を解析対象にした場合、概ね 100TB のストレージが必要である。オリジナルデータが 3TB である場合、1 段階目の解析で 16bit から 32bit への変換されて 6TB のデータが生成される。データ解析においては 1 つの解析毎に新しいデータが作成されるため、10 ステップの解析が必要な場合には 60TB になり、観測データ以外のカタログデータなどを含めると概ね 100TB 程度のストレージが必要と推定される。この数字はあくまでも Suprime-Cam によって取得され、現在公開されているデータまでを扱うための見積りであり、データは順次追加して公開されている。観測装置や手法によって取得されるデータ量には変化があるが、数 GB から数十 GB のデータが毎晩生成されている。これらのデータ解析を如何に円滑に行うことが出来るかが天文学的成果に結びつける上で非常に重要である。

Grid Datafarm はペタバイトスケールデータインテンシブコンピューティングを可能とするためのアーキテクチャとして、(1) ファイル複製管理を含む広域仮想ファイルシステム (Gfarm ファイルシステム) (2) ファイル集合 (Gfarm ファイル) の管理による分散並列データ処理を提供する。その参照実装として Gfarm が開発され、2003 年 4 月よりベータ版が公開されている²⁾。Gfarm は、広域並列ファイルシステム、並列 I/O API 及び、Gfarm ファイルに対するプロセスのファイル・アフィニティ・スケジューラを提供している。Gfarm ファイルを構成するデータファイルは分散配置され、Gfarm URL で単一のファイルシステムイメージとして表現される。一方、スケジューラは Gfarm ファイルを構成する分散配置されたファイルのファイルアクセスがローカルアクセスとなるよう、ファイルが存在するノードにプロセスをスケジューリングする。このことにより、ノード数に応じたスケラブルなファイルアクセス性能が実現される。天文学の観測データは FITS 形式⁷⁾ と呼ばれる一定のフォーマットに基づいて取得される。また、解析ツールもそ

れを前提としているため、複数の FITS ファイルをまとめて Gfarm ファイルを構成し、解析ツールの大幅な変更なしに並列実行が可能である。Gfarm の実装に関してより詳細は、文献 (14), (12), (13) を参照されたい。

本論文では、Grid Datafarm アーキテクチャの参照実装である Gfarm 上で天文学データ解析を行い、実アプリケーションを用いることによって Gfarm にどのような問題が起こり得るか検討した。

2. 観測データおよび解析ツール

本論文では、産総研に設置された AIST Gfarm クラスタ I を使用した。認証には期限付き共有秘密鍵方式を用いており、グリッド環境下における GSI 認証は用いていない。

2.1 AIST Gfarm クラスタ I

性能評価を行うにあたり、産総研に設置された AIST Gfarm クラスタ I のうち、72 ノードを用いた。クラスタの各ノードは表 1 に示したスペックを持ち、80 ノード、160 プロセッサで構成されている。また、計算およびストレージノードとは別に 2.4GHz dual Xeon のメタデータサーバとクライアントとして利用可能な 2.8GHz dual Xeon のノードが用意されている。全ノード間のネットワークはギガビットイーサネットであり、Force10 E600 によりノンブロッキングで接続されている。

表 1 AIST Gfarm クラスタ I のノード構成

CPU	dual Xeon 2.8GHz
メモリ	1GB
DISK†	200GB x 4 / raid0 構成
NIC	GbE

†一部のノードにおいては 120GB x 4 構成

2.2 観測データ

天文学の観測データのほとんどは FITS 規格⁷⁾ に基づいた形式で出力される。FITS は、アスキーヘッダ部とバイナリデータ部で構成されており、ヘッダ部に観測装置や、観測時の情報を記入することが可能である。解析時には FITS ヘッダによってそのデータの情報を得ることが出来る。

すばる主焦点カメラ (Suprime-Cam) は 10 枚の CCD で構成されたモザイク CCD カメラであり、すばる望遠鏡主焦点に設置されている広視野カメラである。10 枚の CCD それぞれが独立した FITS ファイルを出力し、1 枚の FITS ファイルは約 16 MB である。今回の解析で用いたデータは 2002 年 10 月 7 日に取得された 59 セットのデータである。明るさや、バイアス校正用のデータも別途取得されている。

Gfarm ファイルシステムを用いるにあたって、複数枚の FITS ファイルを Gfarm URL として参照可能

な Gfarm ファイルとして構成する。Suprime-Cam では、SUPA00142593.fits のようなファイル名で FITS ファイルを生成し、末尾の 1 桁はチップ毎に 0 から 9 までの番号となっている。解析の手順を検討した結果、二通りの方法で Gfarm ファイルを作成した。

1 つは同時に取得した 10 枚の FITS ファイルから成る gfarm:SUPE00142590.fits である。表 2 の 1 列目がこれに相当し 2 列目以降の 10 枚の FITS ファイルを末尾を 0 に固定し、SUPA の頭文字を SUPE に変更した Gfarm ファイルとして登録した。これは、同時に取得されたデータに対する一括処理する場合に用いる。一方、同一のチップによって取得されたデータに対する処理もあるため、`gfarm:chip3.fits` として末尾が 3 の FITS ファイルだけを集めた Gfarm ファイルを用意した。これは時系列のデータを一つにまとめており、今回の場合 59 枚の FITS ファイルで構成される。Gfarm ファイルの登録の概略を表 2 にまとめる。このように、Gfarm ファイルを複数の FITS

表 2 FITS ファイルの Gfarm URL 対応表

Gfarm URL	chip0.fits	..	chip9.fits
SUPE00142590.fits	142590.fits	..	142599.fits
SUPE00142600.fits	142600.fits	..	142609.fits
..
SUPE00143200.fits	143200.fits	..	143209.fits
SUPE00143210.fits	143210.fits	..	143219.fits

ファイルで構成することにより、解析ツールの根本的な変更が必要とされないようにした。

2.3 アプリケーション

天文学のデータ解析の初期段階においては公開されている解析ツールの利用が可能である。これらのソースコードは公開されていることが多いため、オリジナルソースコードを Gfarm ファイルを扱うための Gfarm API へ変更することも可能である。しかしながら、これらのツールはバージョンアップもたびたび行われるため、バージョンアップに対応するためにも、ソースコードの書き換えは最小限に抑えることが望ましい。また、大幅な書き換えはバグを埋め込むことにもなりかねないため修正を少なくする必要がある。天文学のデータ解析では迅速性も重要ではあるものの、誤った結果を得ることはあってはならないことである。

このような場合やソースコードが公開されていない商用アプリケーションなどのために、Gfarm ではシステムコールをトラップし、Gfarm ファイルを利用するための仕組みが提供されている。コマンドの実行モジュールを作成する際に、`gfs_pio_hook.o` をリンクすることにより `open`, `close`, `read`, `write` などのシステムコールがフックされる。これらのシステムコールはパス名が Gfarm URL かどうかをチェックし、Gfarm URL であった場合のみ Gfarm ファイルとして動作し、基本的にはローカルファイルビューで

アクセスされる。ただし、並列実行ノード数と Gfarm ファイルを構成するファイルの個数が異なる場合にはグローバルファイルビューとなる。

実際に 並列実行するためには、システムコールのフックに加えて、ソースコードの `main` 関数に `gfarm_initialize()` 及び `gfarm_terminate()` を加える必要がある。ソースコードの変更は基本的にこの二つの関数を追加するだけでよい。以下に、これらの修正を施し利用可能となった 4 つのツール群についてそれぞれの機能と特徴、利用方法などを述べる。WCSTools⁹⁾ は FITS ヘッダを扱う基本的なコマンドが提供されている。一次処理ツールは生データから一般的な解析が可能なデータへの処理を提供しており、SExtractor¹⁾ は FITS ファイルからの天体抽出プログラムである。SAOImage ds9¹¹⁾ は FITS 画像ブラウザである。

2.3.1 WCSTools

WCSTools⁹⁾ では、WCS(World Coordinate System)の変換ツールと共に基本的な FITS ファイルアクセス用のコマンドが提供されている。ファイルアクセス部分はライブラリ化されているが今回はライブラリへの変更は一切加えない。Gfarm のフック機能を用い、`main` 関数に `gfarm_initialize` と `gfarm_terminate` を加え、コンパイルして実行モジュールの生成を行った。提供されているコマンドの一つ `gethead` は FITS ファイルのヘッダ部にあるキーワードを以下の操作で取り出すことが可能である。

```
% gfrun gfarm:gethead FRAMEID gfarm:c0.fits
FRAMEID は FITS ファイルのファイル名と等しくなるよう Suprime-Cam では定められているため、このコマンドによって Gfarm ファイルである gfarm:c0.fits を構成する元の FITS ファイル名を知ることが出来る。
```

2.3.2 一次処理ツール

すばる望遠鏡によって取得されたデータのための解析ツールが観測者に公開されており一次処理を行うことが出来る。表 3 にツールの一部とその用途を示す。

表 3 一次処理コマンド群

<code>osmed</code>	画像のトリミングと引き算
<code>arithing</code>	画像 4 則演算
<code>skysb</code>	スカイバックグラウンドの除去
<code>distcorr</code>	画像歪み校正

`gfarm:c0.fits` を例にとると以下の流れで表 3 のコマンドを実行する。

```
% gfrun gfarm:osmed gfarm:c0.fits
                                gfarm:c0o.fits
% gfrun gfarm:arithing gfarm:c0o.fits
  / gfarm::0:mflatc.fits gfarm:c0of.fits
% gfrun gfarm:skysb gfarm:c0of.fits
                                gfarm:c0ofs.fits
```

```
% gfrun gfarm:distcorr gfarm:c0ofs.fits
```

```
gfarm:c0ofsd.fits
```

それぞれの行程で新しい Gfarm ファイルを生成し、便宜上 .fits 拡張子の前にアルファベットを付けて処理行程を明確にしている。

2.3.3 SExtractor

SExtractor¹⁾ (Source Extractor) は4つの設定ファイルと FITS ファイルを読み込み、星や銀河を抽出し、輝度や、形状、分類パラメータをリスト形式で出力する。実行は、以下のように行う。

```
% gfrun -G gfarm:c0of.fits gfarm:sex
```

```
-c gfarm:default.sex gfarm:c0of.fits
-CATALOG_NAME=gfarm:c0of.cat
```

として行う。ここで、`gfarm:default.sex` は設定ファイルの一つであり、このファイルの内容により他の3つの設定ファイルが指定される。これらの設定ファイルはテキストファイルで Gfarm ファイルを構成しており、全てのプロセスが同一のファイルを参照する。設定ファイルは繰り返し利用されるため、本性能測定では事前に全ての実行ノードに複製を作成し、設定ファイルもローカルファイルアクセスとなるようにしている。Gfarm のシステムコールトラップ機能によってこれらの設定ファイルの参照はグローバルファイルビューとなる。

`gfrun` コマンドは引数にある Gfarm ファイルを用いてファイルアフィニティスケジューリングを行う。ここで、`-G gfarm:chip9.fits` と指定しているのは、スケジューリング対象の Gfarm ファイルを陽に指定するためのオプションである。

2.3.4 SAOImage ds9

C++ によって書かれている FITS ファイル描画ツール SAOImage ds9¹¹⁾ がフックを用いることにより動作することが確認できた。図 1 は ds9 のキャプチャイメージである。GUI によるファイルオープン指定で `/gfarm::33:c0of.fits` とすることにより、`gfarm:c0of.fits` を構成する1つの FITS ファイルが描画される。天文学のデータ解析において途中経過をディスプレイし確認する作業は頻繁に行われる。描画ツールの動作が確認できたことにより Gfarm 上で解析を円滑に行うことが可能となると言える。

これらの解析ツールが Gfarm のシステムコールトラップによって動作することが確認できたことは天文学データ解析において非常に重要なことである。本章冒頭でも述べたように、解析ツールは広く用いられておりバグも逐次取り除かれている。Gfarm 上に実装するにあたってソースコードの大幅な書き換えが必要である場合、その変更自身が誤った修正を伴う可能性があるだけでなく、解析ツールの更新が行われた場合への対処に大きな作業が必要となってしまう。特に今回の4つのツール群の動作確認が行えたことで、アーカイブデータを解析する準備が整ったと言える。

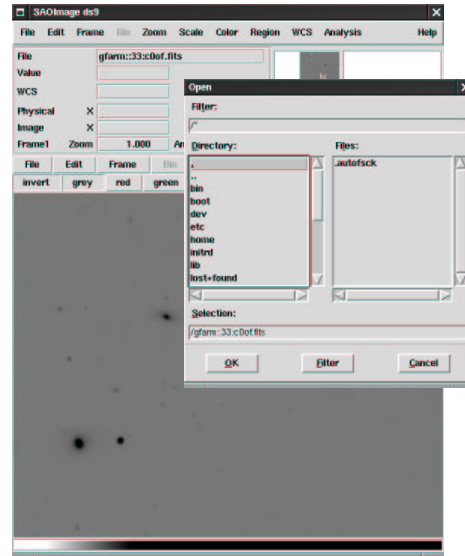


図 1 SAOImage ds9 のキャプチャイメージ

3. 実行時性能測定

前章で、基本的な解析ツールの動作が確認されたことを述べた。続いて、Gfarm で提供されている並列 I/O および並列実行の性能評価を行う。

データ解析ツールの実行に際して Gfarm の性能評価を行うため表 4 に示す Gfarm API の経過時間を計測した。表 4 は `arithing` を用いて読み込んだ二つのファイルを除算し、結果を FITS ファイルに出力した場合のプロファイルである。この実行は単一の FITS ファイルに対して実行した。処理時間が 0 sec になっている行は `arithing` では使用されなかった API である。使用した FITS ファイルは約 32MB であるから、`open/read` で 78.3 MB/s の読み込み性能が出ており、59 フラグメントに対して読み込みを並列に実行した場合 4.6GB/s の読み込み速度が期待される。

表 4 プロファイル対象 Gfarm API

Gfarm API	処理時間
<code>gfs_pio_create</code>	0.00097067 sec
<code>gfs_pio_open</code>	0.298279 sec
<code>gfs_pio_close</code>	0.135429 sec
<code>gfs_pio_seek</code>	0.000753485 sec
<code>gfs_pio_read</code>	0.519306 sec
<code>gfs_pio_write</code>	0.153871 sec
<code>gfs_pio_getline</code>	0 sec
<code>gfs_pio_set_view_section</code>	0.177625 sec
<code>gfs_stat</code>	0 sec
<code>gfs_unlink</code>	0 sec

続いて、並列実行時の性能測定を行う。性能測定を

する際は、それぞれの FITS ファイルはそれぞれのローカルディスクにあるように配置し、全てのプロセスが異なるノードで実行されるように明示的なスケジューリングを行った。

3.1 arithimg による性能評価

一次処理ツール (表 3) の一つとして提供されている画像四則演算ツールである `arithimg` を用いてプロファイリングを行った。処理内容は CCD のピクセル感度ムラを補正するために標準化画像 (フラットフィールド) で観測データを割算するものである。フラットフィールドは別途作成し、10 枚の CCD に対応した 10 個の FITS ファイルで構成されている。ここで、Gfarm URL 指定の拡張である `gfarm::0:mflatc.fits` を利用し、10 個の FITS ファイルで構成されている `gfarm:mflatc.fits` のうち 0 番のファイルを指定した。コマンドラインは以下ようになる。

```
% gfrun gfarm:arithimg gfarm:c0o.fits
/ gfarm::0:mflatc.fits gfarm:c0of.fits
フラットフィールドはそれぞれの CCD チップに対応したものをを用いるため、CCD チップ毎に実行する。
```

図 2 は 59 個の FITS ファイルそれぞれでのプロファイルの結果である。横軸は open にかかった時間で並び変えたノードで、縦軸は表 4 に示したそれぞれの Gfarm API のプロファイルの結果を積み上げたものである。図 2 の 1 番下の線 (others) は、表 4 にある `seek,write,read,create,view` の合計である。次に描画している `open/close` は、`open` と `close` のみでの消費時間である。total はツールの main 関数で測定した実行全体の時間を表しており、`gfrun` の直線は、`gfrun` を実行したクライアントノードでの経過時間を表している。total から `gfrun` までの間は全てのノードのプロセスが終了するまでの待ち時間である。この実行におけるファイルのオープン、ク

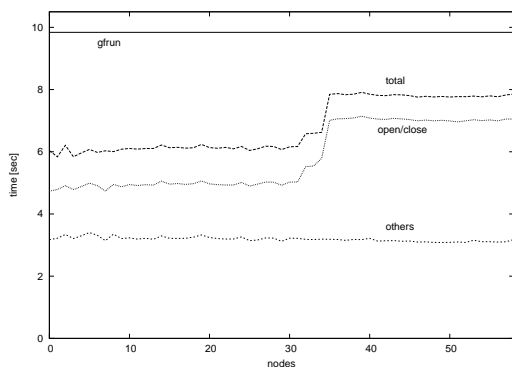


図 2 arithimg によるプロファイル

ローズを含むアクセス時間の合計は 195.0 秒であり、各ノードで 96MB、合計 5664MB のデータの読み書きを行っている。その結果、59 ノードで 1.5GB/s の

I/O 性能が得られた。一方で、図 2 から `open/close` に時間が他よりも長くかかっているノードがあることが分かる。

次に、天体検出ツール `SExtractor` を用いてプロファイリングを行った結果が図 3 である。図 3 は、図 2 と同様の方法でプロットしたもので、このツールは 4 つの設定ファイルと、1 つの FITS ファイルを読み込む。図 2 と同様 `open` と `close` で遅くなるノードが存在している。図 2 とは異なり、`create` にも小さなピークが出ており性能低下が見られる。

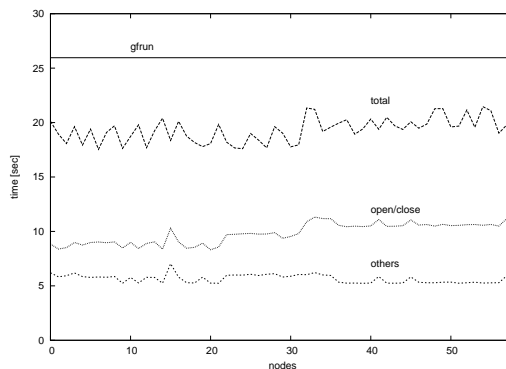


図 3 SExtractor によるプロファイル

プロファイリングにより、Gfarm API の一部で動作が遅くなる現象が確認できた。これは、メタデータサーバへの接続が飽和していることによるものと思われる。そこで、59 個のプロセスを逐次実行した場合のプロファイルを図 4 に示した。図 2、図 3 と同様の図で、total は実行時間の全体であり others は計測した表 4 の Gfarm API 全ての合計である。

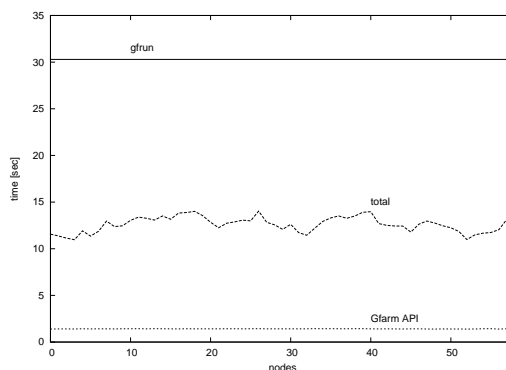


図 4 gfrun を用いずに逐次実行した時のプロファイル

図 4 では、図 3 と比べて明らかに Gfarm API の実行時間が短い。2 者の違いは、プロセスが同時に実行されたか、順次実行されたかである。また、ファイルアクセスは全てローカルディスクに複製を持つ構成

としているためネットワークアクセスは、メタデータサーバへの通信のみである。E600 スイッチの性能から考えてメタデータサーバへのアクセスでネットワークが飽和することは考えられない。そこで、メタデータサーバ (OpenLDAP) を起動しているノードの CPU 利用率を確認したところ、dual CPU とともに、60% 程度の使用率を示していた。デーモンプログラムである slapd は 40 個程度起動している。メタデータサーバノードのプロセッサは限界には達していないが、メタデータサーバがスケールの限界にきているものと思われる。

4. ま と め

Grid Datafarm の参照実装である Gfarm を用いて天文学データ解析ツールの動作確認を行った。システムコールのフック機能を用いることにより、解析ツールを容易に Gfarm ファイルを扱えるように改変し実行可能であることが確認できた。解析では、複数の FITS ファイルを一つの Gfarm URL として登録することにより並列性、解析の実行の単純化を行うことが出来ることが確認された。解析手順が単純化されることは、アーカイブデータ全てを対象にする場合など多数の FITS ファイルを解析する場合に非常に有用である。解析を円滑に進められることで、より天文学的成果に結びつけ易いといえる。

一方、データ解析ツールのブレイクダウンによってメタサーバとして利用している OpenLDAP のスケラビリティの問題が明らかとなった。Gfarm はローカルファイルアクセスを実現することによりファイル I/O の高速化が図られている。予備実験評価においてもノード数に応じたスケラビリティが確認されている¹⁴⁾。しかしながら、実際のアプリケーションにおいてさほど大きくないファイル (今回の場合は、約 32MB) で構成された Gfarm ファイルに対する読み書きを頻繁に行うような場合には、メタデータへのアクセスが頻発し I/O 性能が低下することが明らかとなった。この問題を回避するためメタデータサーバを RDMS へ置き換えること計画しており、今後のリリースで実装する予定である。

本稿では、4つのデータ解析ツールについて述べた。これらのツールが Gfarm 上で動作することが確認できたことによって解析の初期準備が整ったと言える。今後は、公開データアーカイブから Gfarm ファイルシステムへ順次登録し解析を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) Bertin, E., Arnouts, S., *Astronomy and Astrophysics Supplement*, Vol. 117, pp. 393–404 (1996).
- 2) *Grid Datafarm*.
<http://datafarm.apgrid.org/>

- 3) Kaifu, N., Usuda, T. et al.: The First Light of the Subaru Telescope: A New Infrared Image of the Orion Nebula, *PASJ*, Vol. 52, p. 1 (2000).
- 4) Komiyama, Y., Yagi, M. et al.: *PASJ*, Vol. 52, p. 93 (2000).
- 5) INES アーカイブデータサーバ.
<http://iue.nao.ac.jp/>
- 6) *Subaru Mitaka Okayama Kiso Archive system*.
<http://smoka.nao.ac.jp/>
- 7) *Flexible Image Transport System(FITS)*.
<http://fits.gsfc.nasa.gov/>
- 8) *HST Archive*.
<http://hst.nao.ac.jp/>
- 9) *WCSTools*.
<http://tdc-www.harvard.edu/software/wcstools/>
- 10) *NRO Data Archival System*.
<http://nrodb.nro.nao.ac.jp/>
- 11) *SAOImage DS9*.
<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>
- 12) Tatebe, O., Morita, Y., Matsuoka, S., Soda, N., Sato, H., Tanaka, Y., Sekiguchi, S., Watase, Y., Imori, M. and Kobayashi, T.: Grid Data Farm for Petascale Data Intensive Computing, Technical Report ETL-TR2001-4, Electrotechnical Laboratory (2001).
<http://datafarm.apgrid.org/pdf/gfarm-ETL-TR2001-4.pdf>
- 13) Tatebe, O., Morita, Y., Matsuoka, S., Soda, N. and Sekiguchi, S.: Grid Datafarm Architecture for Petascale Data Intensive Computing, *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGrid 2002)*, pp. 102–110 (2002).
- 14) 建部 修見, 森田 洋平, 松岡 聡, 関口 智嗣, 曾田 哲之: ベタバイトスケールデータインテンシブコンピューティングのための Grid Datafarm アーキテクチャ, *情報処理学会論文誌: ハイパフォーマンスコンピューティングシステム*, Vol. 43, No. SIG 6 (HPS 5), pp. 184–195 (2002).
- 15) 馬場肇他: 国立天文台報, Vol.6, pp.23–36 (2002).