

# 1CD-Linux によるグリッドシステムを活用した パラメトリックな数値解析に関する実証的研究

柴田 良一<sup>†1</sup> 加藤 史郎<sup>†2</sup>  
島岡 俊輔<sup>†3</sup> 中澤 祥二<sup>†4</sup>

工学的最適化問題において、網羅的に設計変数間の影響を調べるためには、すべての組合せを計算する必要があり、これまでの最適化手法とは異なる「全数計算」手法が有効である。全数計算では、可能な限りすべての組合せに対して評価関数を計算することが必要であり、著しく高性能な計算能力が必要となる。これに対して、近年注目を集めているグリッドコンピューティングシステムでは、複数の計算機を統合して、高い計算能力を実現することが可能である。そこで本研究では、グリッドシステムを活用して、全数計算による建築構造計算支援を目標として、その実証的研究を行う。

## Study on Efficiency of Parametric Numerical Analysis Using 1CD-LINUX Based Grid Computing System

RYOICHI SHIBATA,<sup>†1</sup> SHIRO KATO,<sup>†2</sup> SHUNSUKE SHIMAOKA<sup>†3</sup>  
and SHOJI NAKAZAWA<sup>†4</sup>

In this research, a 1CD-Linux system (S1GEonKNOPPIX) for building grid computing systems has been developed, aiming to verify the distributed processing capability of the grid using this for structural optimization. First, fundamental numerical analysis throughput was examined and the problem scale of the corresponding large structural analysis was decided. Next, the corresponding throughput to the optimization problem was examined paying attention to the oscillation characteristic of a structure as concrete application, was examined. The test results proved the effectiveness of this grid computing system for complete count analysis of structural optimization.

### 1. 背景

高精度かつ大規模な数値解析においては、つねにより高い計算能力が求められている。これを受け、コンピューティンググリッドを代表とするグリッドは、HPC（ハイパフォーマンスコンピューティング）の1つの手法として注目を集め、様々な大規模システムが開発されている。

一方で、一般の研究者や技術者においては、問題規模の差こそあれ、数値計算の重要性は変わらないはずであるが、その計算環境は十分でない場合が多い。たとえば教育機関においては、教育用の演習用PC群は多数設置されるが、HPC専用計算機の導入は、多くの組織でまだ十分ではない。また中小企業においても、一時的に必要となる大規模数値解析のために、専用計算機の導入は困難である。

そこで、グリッド研究の1つの方向として、上記のようなHPC専用の計算機がない環境においても、既存の限られた計算資源を活用し、誰もが利用できる、より処理能力の高いHPCシステムを構築する手法が必要であろう。たとえば、林らは1CD-LinuxとしてKNOPPIXを用いて、これにSun ONE Grid Engineを組み込むことにより、ポータブルなグリッドシステムの構築を行った<sup>1)</sup>。また柴田らは、同様な手法を活用し教育用計算機群を用いて、大規模なグリッドを実現している<sup>2)</sup>。さらに柴田らは、このグリッドシステ

†1 岐阜工業高等専門学校建築学科  
Department of Architecture, Gifu National College of Technology

†2 豊橋技術科学大学建設工学系  
Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology

†3 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻  
Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology

†4 豊橋技術科学大学建設工学系  
Department of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology

ムを活用して構造最適化問題への適用を検討している<sup>3)</sup>。一方、様々な目的を持ったプログラムを連携して解析する試みを、多田らが進めている<sup>4)</sup>。

これらの研究により、高い計算能力を活用して、先進的な構造解析の研究が進展し、多くの設計変数を考慮する必要のある構造設計においても、十分な検討が可能になることが期待される。

## 2. 目的

本研究では、「誰でも使えるグリッド」を実現するために、次に示す(1)~(4)のような具体的な前提条件を設定し、開発を進めた。これらの条件は、開発の目標を明確にするために設けたが、ここで蓄積された基盤技術はこれらの用途に限定されず、応用範囲の広いグリッド技術である。なお現時点での具体的な研究目的としては、次の2点である。

- 1CD-Linux を用いたグリッドの有効性の検証  
既存の PC 群を CD 起動により転用するグリッドが、どれだけの計算能力を持つかを、構造解析を対象に確認する。
- 構造最適化問題における全数解析の可能性  
高い計算能力を有効利用して、構造最適化問題における設計変数の膨大な組合せに対して、全数解析の可能性を確認する。

### (1) どのような計算を対象とするか

扱う数値計算は、有限要素法をベースとする数値解析を対象として、自由度数が数万程度以下の中規模解析モデルである。これを多数の設計変数に対してパラメトリックに解析し、最大数万ケースまでを処理することを目標としている。これまでの HPC が、数億自由度以上の超大規模解析モデルを、限られた条件で解析することを目的としていたのに対して、本研究のグリッドでは、多数のジョブを処理するスループットの性能に期待している。

### (2) どのような利用者を対象とするか

開発するグリッドは、誰でも使えることを条件として、簡単に構築でき、容易に運用でき、手軽に利用できることを目指している。よって、HPC 専用機を持たない技術者や研究者が、手元にある PC 群を活用する場合や、CAD 端末や演習用端末を組織的に活用することを想定している。

### (3) どのような機器を用いて実現するか

このグリッドは、基本的に他の目的で導入された PC 群(主に Windows 系 OS で動作するもの)を活用することが前提である。よって、グリッド専用の機器を導入することなく実現できるために、非常に安価な導

入コストになっている。機器を接続するネットワークも、通常利用している LAN をそのまま利用できる。またソフトウェアにおいても、自由に利用できるもので構成されているため、ライセンスのコストに制限されず、計算ノードを増加させることが可能である。

### (4) このグリッドで何が実現されるか

企業の設計開発においては、導入された PC 群の、業務用端末としての利用を外れた夜間や休日に着目した遊休計算資源の活用が、コスト削減に有効であろう。教育研究においても、大量に導入された教育用端末群は、用途が限定されているため、利用時間はきわめてわずかなのが実状である。つまり、グリッドを活用することにより、既存の計算資源の遊休時間を再活用し、潜在的な数値解析の需要に応えることが可能になるであろう。

## 3. Sun ONE Grid Engine と KNOPPIX によるグリッド構築

### 3.1 PC 群の起動の条件

本研究で構築するグリッドでは、既存の PC 群を対象とするが、その多くが Windows を OS として動作している。一方、現時点で公開されているグリッドシステムは、その多くが UNIX 系 OS 上で動作することが前提である。よって、PC 群を Windows PC のままグリッド化するためには、新たなミドルウェアの公開を待つ必要があり、現時点では困難であるといえる。

また、既存の PC 群は本来の目的を持っており、内蔵 HDD などの情報はこれらの利用に占有される場合が多い。HDD の空き領域を用いてデュアルブートやエミュレーターのインストールも考えられるが、実際の運用状況では困難な場合が多く、その作業コストも膨大であり、現実的ではない。

そこで、Windows 用の内蔵 HDD を利用せず、独立してブートすることが必要になり、現時点での PC の標準デバイスを見ると、CD の活用が現実的と考えられる。またこの起動方法では、起動用 CD を工夫することにより、個々の PC に対する設定はまったく不要であり、必要に応じてグリッド構成を自由に変更できる利点もある。

### 3.2 グリッドソフトウェアの条件

選択にあたっては、研究目的から、利用者はシステムを構築した本人または関係者であり、特別なユーザ認証を必要としないパーソナルな利用を前提としている。

本研究で開発するグリッドの目的は、大規模数値計算の並列処理のピーク性能を追求するのではなく、中

規模のジョブが多数ある場合のスループットを期待するため、並列処理に特化する必要はない。

グリッドの基本条件であるオープンスタンダードを利用し、さらに上位のグリッドと連携し、グローバルな展開が可能であることが必要である。

3.3 1CD-Linux としての KNOPPIX

本研究では、1CD-Linux として KNOPPIX を採用した。現在非常に関心を集めるシステムであり、デスクトップ環境としての利用を中心に、カスタマイズされた専用 Linux 環境の構築がさかんである。

特徴としては、ハードウェアの自動認識能力が高く、ほとんどの PC でネットワーク設定までを自動で行うことが可能である。また、システム内部が公開されており、活発なユーザグループによる情報交換がなされ、カスタマイズのノウハウが豊富である。

3.4 グリッドとしての Sun ONE Grid Engine

先にあげた条件を満足するミドルウェアとして、サン・マイクロシステムズが提供している Sun ONE Grid Engine (以下 S1GE と略記) を利用した。

標準版は無償でバイナリパッケージが公開されており、容易にインストールが可能なミドルウェアである。GUI も備え、本研究で目的とするグリッドにおいては、十分な機能を有する最適なシステムといえる。

4. グリッド構築の方法

S1GE を用いたグリッドは、表 1 に示す 3 種類のホストにより構成される。この中で、実行依頼ホストの機能は、不特定のユーザが利用する場合には、認証を行ううえで区別する必要があるが、今回のグリッドではその必要がないため、管理制御ホストに組み込む形で構築を進めている。

管理制御ホストは、NFS の機能により、実行処理ホストに対してプログラムや入出力データのファイルサーバとして働く。さらにグリッドの各種サービスを提供する必要があるため、グリッド用の PC を用意して、Red Hat Linux 8 による LinuxBOX を利用した。このホストは、固定的にグリッドを管理制御するための仕組みをインストールしている。

実行処理ホストは、本研究の要である WindowsPC の転用を実現するため S1GE を組み込んだ KNOPPIX-

CD を開発し (以下では S1GEonKNOPPIX と略記)、これより起動して一時的にグリッドの実行処理ホストとして利用するものとした。この S1GE を KNOPPIX に組み込む手法は、林らの研究を参考に行った。

具体的には、S1GEonKNOPPIX は、1 つの CD イメージで起動しながらも、個別の実行処理ホストとして識別される必要がある。そこで、起動時に動的にネットワーク設定を行い、管理制御ホストと連携をとる仕組みが必要である。また、実行処理ホストに内蔵されている HDD は利用しないため、ホームディレクトリを NFS マウントする設定なども行い、メモリと CD のみを記憶装置としてグリッドのノードになる仕組みになっている

5. 教育用 PC 群を用いた大規模グリッドの構築

S1GEonKNOPPIX の実用性を検証するために、大規模グリッドの例として、図 1 に示すように、128 台の教育用演習 PC を用いたグリッドを構築した。構成としては、1 台の管理制御ホストと 128 台の実行処理ホストであり、各ホストの仕様は表 2 に示すとおりである。

なお、実行処理ホストの CD 起動については、プロトタイプのため手作業による電源投入と CD 装着を行っている。若干の手間になるが、実際の運用時には、

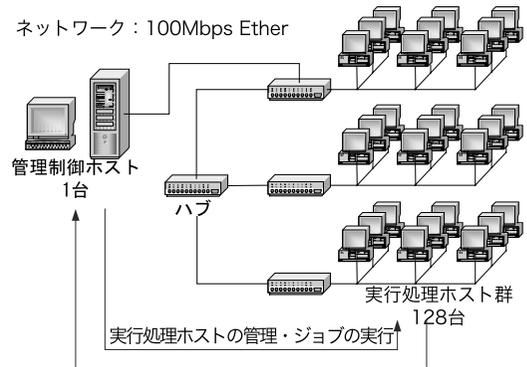


図 1 グリッドシステムのネットワーク構成

Fig. 1 Configuration of grid computing system network.

表 1 S1GE のホスト構成 Table 1 Configuration of S1GE System.

役割	内容
管理制御ホスト	ジョブの全体を管理する
実行依頼ホスト	ジョブの実行を依頼する
実行処理ホスト	ジョブを引き受け処理する

表 2 各ホストのシステム仕様 Table 2 Specification of each host.

	管理制御ホスト	実行処理ホスト
OS	Red Hat Linux 8	KNOPPIX 3.3
CPU	AthlonMP 2000+	Celeron 667 MHz
RAM	2048 MB	128 MB
LAN	100 M Ether	100 M Ether
CDD	-	12 倍速

企業などでの利用であれば、最後の利用者が終了時に CD 起動することも可能であると考えている。今後、さらに大規模化を予定しており、その場合には CD 以外の起動方法として、Linux のネットワークブートや Windows 上での UserModeLinux, coLinux などの技術を検討している。

また逆に考えると、この手法では既存 PC に対してインストールや設定変更などをいっさい行う必要がないため、100 台程度のプロトタイプとしては効率的な方法であると思われる。KNOPPIX のハードウェア認識能力は非常に高く、ここで利用された CD は他の計算機環境でも利用可能であり、管理制御ホストのサーバと CD を、LAN 接続された PC 群に適用することで、ポータブル(可搬)なグリッドとしての活用も考えられる。

ネットワーク構成は、NIC やスイッチはすべて 100 Mbps であり、45 台程度が 1 つの教室にあり、これらをスイッチで結合し、さらに上位のスイッチで 3 つの教室を結合している。この中から 128 台を実行処理ホストとしている。なお、複数の PC が連携して 1 つの問題を解く並列処理では、PC 間のネットワーク接続が大きなボトルネックになるが、今回のグリッドでは PC ごとに独立した分散処理であるため、100 Mbps のネットワークであっても十分実用的に動作する。

管理制御ホストは、実行処理ホストへホームディレクトリを NFS サービスしているが、プロトタイプのジョブでは出力ファイルの容量が少ないため、HDD の使用量は少ない。最も多い例題でも、1 ケースの解析で 1 MB 程度である。ただし、1 台の管理制御ホストの NFS サーバに、128 台の実行処理ホストが、ほぼ同じタイミングで書き込みをするため、NFS の高負荷状態が続き、グリッドの分散処理に影響を与えることが確認された。

## 6. 大規模グリッドの基本性能の検証

本研究で開発したグリッドに最も期待する性能は、多数のジョブを分散処理して、スループットを向上させることである。そこで、多数のジョブを投入したときに、グリッドの起動台数の違いによって、全ジョブを処理する時間がどう変化するかを計測した。

対象とするジョブは、有限要素法による骨組解析プログラムとし、3 次元トラス構造物の線形弾性応力解析を行った。例題として、図 2 に示すような自由度数 792 のモデルに対して、様々な荷重パターンを設定し、512 回解析を行う場合を想定した。今回用いた実行処理ホストでは、1 回の解析が約 1 分程度で、実行プロ

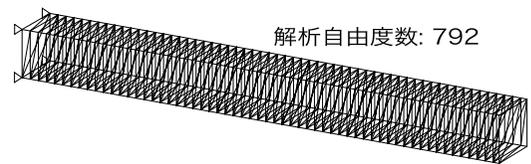


図 2 基本性能検証の解析モデル

Fig. 2 Analysis model for basic performance verification.

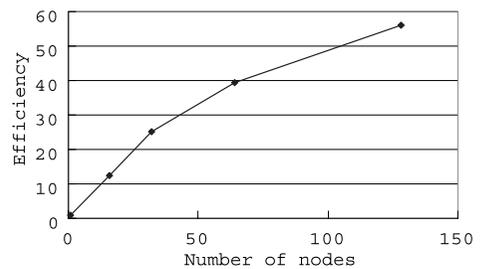


図 3 基本性能評価での速度向上倍率と台数との関係

Fig. 3 Relation of efficiency to number of nodes in basic performance verification.

グラム 66 KB, 入力データ 30 KB, 出力データ 40 KB の解析である。

1 台の解析ホストで実行した場合の計算時間に対して、複数の解析ホストでグリッドを構成した場合の解析時間の短縮を速度向上倍率 (Efficiency) と定義して、台数 (Number of Nodes) と倍率との関係を図 3 に示す。

この結果より、128 台のホストで約 55 倍の速度向上であり、8 時間半必要な解析を約 10 分で完了させたことになった。この例では、1 つの解析時間が 1 分と短いため、解析処理の分配に必要な時間の影響が大きかったものと思われる。

解析の様子を観察すると、NFS で共有化されたプログラムファイルから、全 128 台がいっせいに起動することになり、入力ファイルからのデータ読み込み時とあわせて、このときに NFS サーバの応答遅延が確認された。このメッセージは、サーバのハードウェア性能によって変化するが、分散処理の場合には、全体の解析時間が長い場合には致命的な障害とはならない。

### 6.1 大規模グリッドでの実用構造計算での検証

グリッドコンピューティングを建築構造分野で活用する例として、様々な設計変数のもとで目的関数を満足するような、最適設計解を求める構造設計を対象とした。

実際の構造物の設計では、様々な選択肢の中で安全性や経済性を満足するような合理的な設計を実現するために、最適設計が必要である。しかし、そのパラメータの組合せ数は著しく膨大であり、十分に多様な

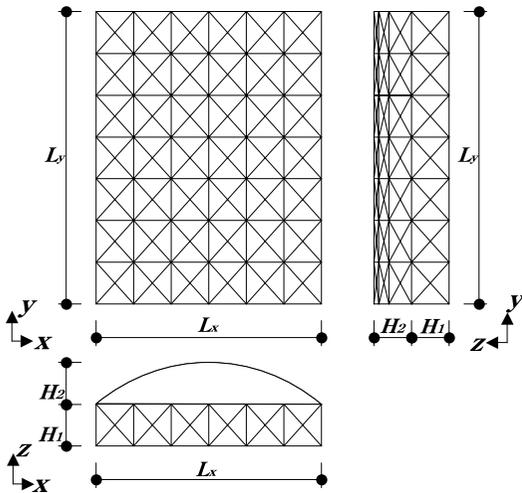


図 4 実用構造計算の解析モデル

Fig. 4 Analysis model of practical structural design.

場合に対応した計算ができないのが現状である。また、技巧的な最適手法を用いることで、ある程度の推定はできたとしても、構造設計の様々な可能性の中で、本当に最適解であるかを判断することは困難である。そこで、ある程度の問題規模であれば、グリッドの高い計算能力を用いることにより、すべての場合を計算する全数計算が、現実的に可能になると考えている。そこで、実用構造計算の例題を用いて、構造物の最適設計問題における全数解析の有効性を検証する。

## 6.2 問題設定

図 4 に示す鋼材で構成されたアーチ架構を対象とする。アーチ架構は、並立する柱付き単体アーチと、それらを接続する屋根面ブレース、および妻面ブレースから構成される。

この検証では、アーチ架構を簡略化したモデルを使用し、妻面ブレースと屋根面ブレースが降伏することによるアーチ架構の耐震性への影響を検討する。

## 6.3 パラメータの構成

単体アーチの固有周期  $T_0$  は、0.25 から 0.75 秒までを 0.05 秒刻みで 12 ケース、屋根面ブレースと妻面ブレースの設計用降伏剪断力係数は、0.20 から 0.70 までを 0.05 刻みで各々 11 ケース設定した。入力地震波は、地盤の状態を配慮した位相特性を有する 5 波を作成した。それぞれについて 6 倍までのレベルを作成し、合計 30 波の入力波を設定した。これによりまとめると、5 種類の設計変数の組合せ数は、すべてを掛け合わせて 43,560 ケースとなる。

## 6.4 解析結果

本研究の目的は、グリッドコンピューティングの有効性を検証することにあるので、解析結果の構造工学

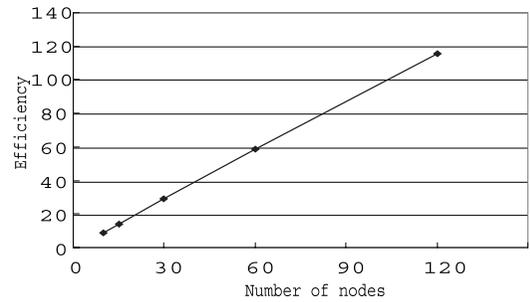


図 5 実用構造計算の速度向上倍率と台数との関係

Fig. 5 Relation of efficiency to number of nodes in practical structural design.

的な分析は省略する。ここでは、グリッドコンピューティングによって得られた膨大な解析結果が持つ工学的な意義を評価する。

グリッドにより計算された膨大な解析結果を利用することで、次のような場面で、構造設計の効率的な判断が可能となるものと期待できる。

- 設計変数間の関連が一覧できるので、パラメータを変化させた場合の効果を評価しやすい。
- パラメータの組合せによって生ずる特異な挙動に対しても、全数解析によりあらかじめ把握することができる。
- パラメータ間の影響度合いが確認でき、目的関数の調整において、最適な設計変数が選択しやすい。
- 多くの設計変数に対して実用的な範囲の解析をグリッドで計算しておけば、構造設計の試算開始時点で耐震性能の予想が得られるため、見通しの良い設計が可能になる。

## 6.5 検証結果

今回構築したグリッドにおいて、1 台のホストで計算した場合、すべての組合せを計算するためには、9,720 分（7 日弱）必要となる。これは 1 回が約 15 秒程度でこれを連続して全数繰り返した場合の経過予想時間である。そこで、120 台構成のグリッドを構築し、計算を分散処理で行った結果、83 分で完了することを確認した。

次に、この計算性能とグリッドの構成台数との関係を調べるために、台数を変化させ同様の計算を行った結果を図 5 に示す。これより、台数に対する速度向上倍率は、ほぼ線形であり、十分なスケラビリティを持つことが分かった。計算機 1 台との比較に直せば、117 倍の速度向上になっている。これは、1 回の解析時間が 27 分と比較的長く、オーバヘッドの影響をあまり受けなかった結果と思われる。

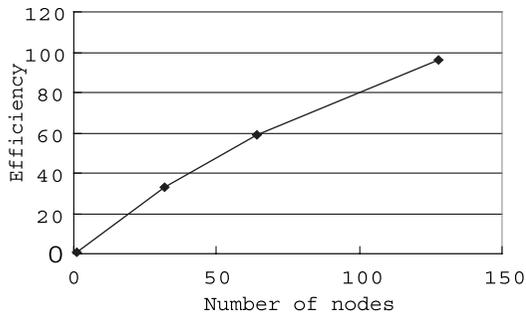


図6 入出力をともなう場合の速度向上倍率と台数との関係  
Fig.6 Relation of efficiency to number of nodes in large I/O analysis.

## 7. 大規模グリッドでの入出力をともなう数値計算での検証

これまでの2つの例題では、入出力ファイルが著しく小さい場合であったが、実用的な数値解析では、大量の計算結果を出力ファイルとして保存するケースが多い。そこで、1MB程度 of 出力ファイルをとこなう数値解析での検証を行った。

解析の規模としては、今回のグリッドの実行処理ホストで、1回の解析が約2,000秒程度のジョブを、294回繰り返す問題設定で、単純に1台のPCで連続して行くと、約164時間(7日程度)必要とするものである。また、入力ファイルとしては355KB、出力ファイルとしては1098KBのファイルIOをとこなう解析である。なお、解析はパラメータの組合せによって、解を得るまでの時間が異なっているが、平均として2,000秒程度となっている。

グリッドによる分散処理の効果を評価するために、32, 64, 128台の3種類の実行処理ホストにおいて、297ケースの解析を行った結果を、図6に示す。

1つの解析は2,000秒と大きいため、オーバーヘッドの影響は少ないものの、1つのケースで1MB程度の計算結果を出力することになり、ホスト台数が多くなるにつれて、NFSの高負荷による速度低下が起きているものと思われる。ただ、その場合であっても、128台で96倍の速度向上率を達成している。

## 8. 全数解析の可能性

最適化問題の数値的解析手法は、様々な問題に応じて提案されており、問題の性質によって使い分けが必要である。

今回検証した建築構造物の最適化問題においては、多くの設計変数があるとはいえ、従属的ではなく独立して特徴的な相互関係を持つ支配的なパラメータは、

それほど多くはないと考えられる。実際の構造設計においても、設計パラメータを絞り込み、特定することが行われている。よって、現実的な問題においては、設計パラメータの数は10以内に収まるものと、ここでは想定した。

次に1つの設計パラメータで検討されるケースは、仕様や条件から判断される場合、こちらも多くても選択肢が10以内に設定されると考える。そうすると、すべての組合せの数は膨大とはいえ、多数の計算機により分散処理を行うグリッドを使うことにより、現実的な解析時間で処理が可能になると期待される。

ここで対象とする分散処理では、構成台数にほぼ線形的に比例して速度向上が望めるので、たとえば今回の検証で用いたグリッドのように115倍の速度を持っていれば、実際の解析時間1時間は、100倍としてほぼ4日間に相当し、現実的に不可能な解析を十分実用的な範囲で可能にするものと期待している。

## 9. まとめ

S1GEonKNOPPIXを用いたグリッド構築を行い、教育用計算機群を用いた128(120)台構成の大規模グリッドを構築した。ジョブの計算時間に注目して、グリッドの効果を検証した結果、基本性能の検証では128台で55倍、実用構造計算の検証で120台では115倍、入出力をともなう場合でも96倍のスループットの向上を確認できた。専用のハードウェアを購入することなく、PCを1CD-Linuxで転用したグリッドにおいても、有用な計算資源となることが実証できた。

今後の課題としては、膨大な数の解析を行うために必要なプリ・ポスト処理の効率化を進めてゆく必要がある。たとえば、プリ処理では、解析に用いる入力データセットの自動構成が必要で、ポスト処理では、膨大な解析結果から目的とするデータを検索し、特徴的な相互関係を有するパラメータを抽出するデータマイニング的に処理が求められている。

## 参考文献

- 1) 林 憲一, 山方和昭, 澁谷寿夫: Sun ONE Grid Engine と KNOPPIX による簡易グリッド環境の構築, pp.163-164, SACSIS2003 (2003).
- 2) 柴田良一, 林 憲一, 山方和昭, 澁谷寿夫: Sun ONE Grid Engine と KNOPPIX を用いた教育用 PC 群による大規模グリッド構築に関する基礎的研究, 情報処理学会第 66 回全国大会講演論文集 (5), pp.5-69-5-72 (2004).
- 3) 柴田良一, 島岡俊輔, 中澤祥二, 加藤史郎: 1CD-Linux を用いたグリッド上での分散処理による構

造最適化に関する基礎的研究—グリッドの処理能力と問題規模の検討，日本計算工学会講演論文集第9回，pp.659–662 (2004).

- 4) 多田元英，桑原 進：インターネットで異種プログラムを統合した構造解析システムの基本考察，日本建築学会構造系論文集，No.580，pp.113–118 (2004).

(平成 17 年 1 月 23 日受付)

(平成 17 年 5 月 5 日採録)



柴田 良一（正会員）

昭和 41 年生．平成 6 年豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了．同年岐阜工業高等専門学校に勤務．建築構造解析学の研究開発に従事．平成 11 年より同校助教授．

グリッドコンピューティングのシステム研究開発に従事．博士（工学）．平成 16 年総務省東海総合通信局長表彰受彰．



加藤 史郎

昭和 20 年生．昭和 47 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了．同年名古屋大学工学部に勤務．構造解析学としてシェル構造の研究に従事．昭和 61 年より豊橋技術科学大学教授．クーリングタワーの地震時応答特性等を研究．昭和 61 年日本建築学会賞受賞．



島岡 俊輔

昭和 53 生．平成 15 年豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了．現在，同博士後期課程に在籍．大空間構造物の数値解析の研究開発に従事．



中澤 祥二

昭和 45 年生．平成 10 年豊橋技術科学大学大学院博士課程修了．平成 10 年日本学術振興会特別研究員 PD．平成 11 年豊橋技術科学大学に勤務．建築構造物の制御に関する研究開発に従事．博士（工学）．平成 10 年日本建築学会東海賞受賞．