

# HPCI先端ソフトウェア運用基盤の構築と運用

三浦 信一<sup>1</sup> 滝澤 真一郎<sup>2</sup> 松岡 聡<sup>1</sup> 棟朝 雅晴<sup>3</sup> 實本 英之<sup>4</sup> 小林 泰三<sup>5</sup>

**概要:**平成 24 年度より運用が開始されている HPCI では、スーパーコンピュータ「京」や基盤センター群が保有するスーパーコンピュータ間の認証基盤統一、データ共有を実現している。しかしながら、既存のスーパーコンピュータシステムはバッチキューでジョブ管理されていることや、計算ノードでの管理者権限がないため、OS や分散システムの研究開発を行う CS 系ユーザの利用環境条件を満たさない。また、インターネット上より各種データを取得し、それをを用いた計算を行う場合や、得られた成果を外部に公開するには、スーパーコンピュータの利用は不向きである。そこで我々は、利用者に対してシステムへの管理者権限を付与する広域分散システムのホスティング機能を提供する、先端ソフトウェア運用基盤を HPCI の枠組みの中で構築し、平成 26 年 4 月より本格運用を開始する。本稿では先端ソフトウェア運用基盤の設計、構築及び運用について紹介する。

## 1. はじめに

計算科学の進歩により、スーパーコンピュータを用いた科学技術計算が学术界や産業界などの幅広い分野で利用されている。このような計算科学の発展を支えるため、国内主要大学や研究機関では、大規模なスーパーコンピュータの整備・運用がなされ、多くのユーザが利用している。しかし、これらの日本国内に点在する学術機関のスーパーコンピュータは、ハードウェア・ソフトウェアの制約や運用方針の違いから、各機関で独立に運用され、計算内容や手法による適材適所での実行や、負荷分散等の点において、効率的な運用が難しい状態であった。このような問題を解決するために、日本国内にあるスーパーコンピュータを一体的に利用する革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラストラクチャー（以下、「HPCI」という）が HPCI コンソーシアム [1] からの提言に基づき、文部科学省により推進されている。HPCI にはスーパーコンピュータを有する国内主要大学の基盤センターや研究機関が参加しており、世界最大規模のスーパーコンピュータである「京」を始めとした国内に点在する主要な計算機資源を国立情報学研究所が運用する SINET4[2] の広帯域なネットワークを用いて接続している。HPCI は平成 24 年 9 月より運用が開始され、現在までに多くの課題が選定され実施されている [3]。

これらの HPCI に参画する基盤センター設置のスーパーコ

ンピュータは、細かな差異はあるが、基本的に以下に示す利用制限がある。

- スーパーコンピュータ内部の各計算資源はプライベートネットワークで接続され、多くの場合で外部との通信はログインノードのみが許されている
- スーパーコンピュータ内部の各計算資源が外部システムと直接通信が可能である場合においても、ファイアウォール等により通信が制限されている
- 互換性の維持やメンテナンス性の確保のため、特定の OS・システム・アプリケーションソフトウェアのみが提供され、最新の OS もしくはソフトウェア環境を利用できない
- 一般利用者としての利用権限のみをユーザに付加し、root 等のスーパーユーザ権限を必要とするシステムの変更は一切許されていない
- バッチジョブスケジューラによるジョブ管理がなされ、24 時間 365 日稼動するようなサービス型の使用は想定されていない

このような制限は、科学技術計算を目的とする典型的な利用者（以下、「HPC ユーザ」という）にとっては問題になることは少ない。一方、システムソフトウェアの頻繁な変更や様々な環境のネットワークを必要とするシステム研究者（以下、「CS 系ユーザ」という）には、基盤センター等のスーパーコンピュータは制約事項が多く、利用し難い環境であった。また、一般的な HPC ユーザの場合においても、特別な ISV (Independent Software Vendor) アプリケーションを利用する場合、OS などのシステムソフトウェアやハードウェア環境の動作保障の問題等により、既存の

<sup>1</sup> 東京工業大学学術国際情報センター  
<sup>2</sup> 理化学研究所計算科学研究機構  
<sup>3</sup> 北海道大学情報基盤センター  
<sup>4</sup> 東京大学情報基盤センター  
<sup>5</sup> 九州大学情報基盤研究開発センター

スーパーコンピュータ環境を利用することが難しいことがある。このような問題を有するユーザの多くは、個別に計算資源を構築したり、他の機関の計算資源を個別に共用するなどしたりして研究や開発を行ってきた。また、クラウドコンピューティングに技術発展に伴い、Amazon EC2に代表される IaaS (Infrastructure as a Service) 型のクラウドサービスなどを利用した仮想計算機環境を構築し利用している場合もある。

このように HPCI の主要計算資源となるスーパーコンピュータは利用に際して制約が多く、一部の研究者にとっては研究に適した環境ではないことが多々あるため、これら需要に応える計算機環境を HPCI の枠組みの中で提供する必要があります。そこで我々はこれらの問題を解決する、スーパーコンピュータ以外の HPCI の資源として「先端ソフトウェア運用基盤」を提案し構築を行っている [4]。先端ソフトウェア運用基盤は全国に分散配備された小型クラスター、あるいは仮想計算機（以下、「VM」という）実行機能を持つ計算資源を集約したシステムであり、利用者の VM 実行要求に基づき、オンデマンドに管理者権限が付与された VM を指定されたサイトで実行するものとして設計している。本基盤は、HPCI の基本的な枠組みの中で構築され、HPCI 共通の認証基盤や広域データ共有環境との相互接続性を提供する。先端ソフトウェア運用基盤は、基本的なシステムの整備を経て、平成 26 年 4 月より本格的な運用を開始する予定である。

本稿では HPCI 先端ソフトウェア運用基盤の設計の概要と整備内容を紹介すると共に、今後の運用についても紹介する。まず 2 節において HPCI における先端ソフトウェア運用基盤の概要について示す。3 節では、先端ソフトウェア運用基盤の設計と実装について示し、4 節において、本システムの主要サービスである分散環境ホスティングサービスの構築について示す。その後、5 節において、現在のシステム構成と運用について示す。

## 2. 先端ソフトウェア運用基盤

HPCI の利用者区分毎に、想定される利用シナリオと、そのシナリオで要求される計算資源のタイプを表 1 に示す。HPC ユーザは各種シミュレーションや大規模データ解析等の大規模並列計算を必要とする応用計算分野の利用者であり、CS 系ユーザは OS やシステム・ライブラリソフトウェア、分散システムなどの計算機システムの基盤となるソフトウェアの研究開発を行う利用者を示す。HPCI を構成するスーパーコンピュータ群はバッチキューを介したジョブ実行サービスを提供するシステムであり、表 1 の内、満たせる利用シナリオは (1) のみである。先端ソフトウェア運用基盤では、それ以外の利用シナリオを実現するために必要な、表中の (2)~(7) に該当する要求環境を提供するシステムである。

従来これらの環境は、「研究者が個別に計算機を用意する」、「共同研究等の一定の合意の元で他機関の計算資源を利用する」、「クラウド計算資源や各種ホスティングサービスの商用サービスを用いる」、といった方法で実現されていた。しかしながら、大学の基盤センターにおいても Web 等のホスティングサービスが提供されているため、HPCI にそれらサービスを組み込むことにより、利用者がそれらの資源を有効活用できるよう運用できる。また、グリッドにおける Super Scheduler や Resource Broker 等の並列計算機およびストレージを連携させるサービスの実験を行う際に、Amazon EC2 の様な IaaS クラウドサービスでは環境整備、金額面でのコストが大きい。一方で、HPCI の枠組みの中でスーパーコンピュータに隣接したサーバのホスティングを提供することで、既存のスーパーコンピュータ資源を活用した実証・評価が行える。先端ソフトウェア運用基盤は、各拠点に配備されたホスティングサービスを統一的に管理し、利用者が要求する環境を提供するシステムとしての役割を担う。

以上より、先端ソフトウェア運用基盤を実現するための要件を以下にまとめる。

### 利用者別に権限付与可能なシステム提供

利用者毎にシステムに要求する権限が異なるため、利用者毎の利用シナリオに合わせた環境を提供できることが望ましい。例えば、CS 系ユーザは管理者権限を要求するが、利用可能 OS に制約のある ISV アプリケーションを実行したいだけの HPC ユーザには管理者権限が必要ないこともある。特に、Web ホスティングのみを要求している利用者はコンテンツのアップロード権限さえあれば十分で、煩雑なソフトウェアの管理から逃れたいと考えている者も多い。

### 分散環境の動的配備

分散システム研究者の実験・評価環境提供のために、広域分散環境を配備できる機構が必要である。また、ホスティングサービスを提供する機関が大学の場合、定期的な全学停電が行われる組織もあり、このようなイベントに際して、利用者が動的に環境を構築・解放できる仕組みが必要である。また、利用者によっては複数のソフトウェア、複数のバージョンを切り替えて比較評価する場合もあり、システム側で支援する仕組みを有することが必要である。

### リソース利用制限

分散環境を利用者に提供するものの、個別ホスティングサービスへの利用権限は別途管理されなければならない。また、オーバプロビジョニングとならないよう、利用者毎の利用可能資源量を制限する機構も必要である。

### 多種ネットワーク環境への対応

利用者が使用する計算機・サービスを接続するネットワークは、利用者毎の用途によって異なる。一般的な Web 公開用のサーバであれば、Internet 接続しているグローバルなネットワーク上にサーバを展開する必要がある。ま

表 1 HPCI 利用シナリオ

利用者区分	利用シナリオ	要求環境
HPC ユーザ	(1) HPC リソースを用いた大規模計算（データ解析・シミュレーション等）を実行	HPCI 拠点リソース（スパコン）を利用
	(2) 特定 OS・ライブラリに依存するアプリケーションを実行	高信頼なサーバでのホスティングが求められる
	(3) HPC リソースにアクセスするためのポータルサービスを実行	
CS ユーザ	(4) root 権限を必要とする OS 研究開発	管理者権限を持ったサーバからなる、必要に応じて分散配備可能な開発環境が求められる
	(5) 開発したライブラリの、複数種 OS 上での検証	
	(6) 多拠点にグローバル IP を必要とする分散システムの開発	
共通	(7) 成果公開・プロジェクトメンバー内情報共有のための WEB ポータル運用	高信頼なサーバでのホスティングが求められる

た、多サイトにまたがる分散システムの研究や、サイト内の特定資源と接続する必要のあるサーバを構築するためには、専用のネットワークに接続できる必要がある。このようにサーバだけでなく、ネットワークに対しても利用者が要求する環境を整備できる必要がある。

#### 操作・管理インターフェースの統一

各拠点に配備されたホスティングサービスを統一的に管理する役割上、サービス間での操作・管理のためのインターフェースの統一が必要である。

#### HPCI 資源との相互接続性の確保

HPCI の枠組みでの利用を想定した場合、既に HPCI で運用されているスーパーコンピュータなどの資源と連携して利用できることが求められる。HPCI では採択課題のユーザには全システム共通の HPCI アカウントが発行され、Shibboleth[5] や GSI 認証 [6] を用いたシングルサインオンなどの統一的な認証機構が提供されている [7]。また、HPCI システム間のデータ共有用のストレージとして、HPCI 共用ストレージが整備されている [8]。HPCI 共用ストレージは、東京大学 情報基盤センター、理化学研究所 計算科学研究機構の東西に分散して設置され、Gfarm ファイルシステム [9] を用いて総容量 20 PB 以上のファイルシステムが構成されている。他の HPCI システムと連携した利用が可能になるよう、HPCI の統一的な認証機構や HPCI 共用ストレージと相互に接続することが必須である。

### 3. 設計と実装

前述のシステム要件を満すため、先端ソフトウェア運用基盤は各種ホスティングサービスをまとめるための「ユーザアクセスインターフェース」と分散環境を利用者が構成できる「分散環境ホスティングサービス」を提供する。

#### 3.1 ユーザアクセスインターフェース

ユーザアクセスインターフェースは各地に存在するホスティングサービスへの窓口として提供する。理想としては

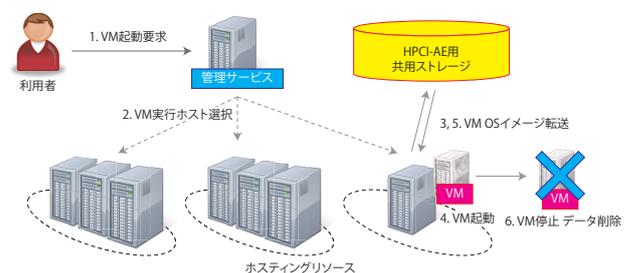


図 1 分散環境ホスティングサービス

API レベルで異種ホスティングサービスの操作ができる、HPCI 認証基盤と連携したシングルサインオンで各サービスにログインできる、ことが望ましいが、実現には既存サービスへの大がかりな修正を要する。そのため、現実的な対応としてホスティングサービスへのリンク集とする。

#### 3.2 分散環境ホスティングサービス

分散環境ホスティングサービスは、利用者に root 権限を付与したサーバからなる広域分散環境を提供するサービスである。分散環境ホスティングサービスはサーバ環境を利用者に VM の形で提供する。VM を採用した理由は以下の通りである。

**サーバ運用の安全性** 利用者によるファームウェア等のハードウェア更新を許可しない。

**資源の有効活用** 利用用途にもよるが、メニーコア・大容量メモリを搭載した物理サーバの普及により、多数の利用者の要求を少数の物理サーバに集約可能。

**ソフトウェア資源の共有と再利用** VM で使用する OS イメージとして、各種ソフトウェアがプリインストールされたイメージを共有・再利用することで、利用者が求める環境を迅速にかつ容易に構築できる。

分散環境ホスティングサービスのシステム構成を図 1 に示す。本システムは VM を実行するホスティングリソース、OS イメージの保存に使用する共用ストレージ、利用者からのリクエストを処理する管理サービスの 3 種類のコ

ンポーネントより構成される。

**ホスティングリソース** 分散配置された VM 実行機能を持つ物理サーバ、あるいはクラスタ構成の計算機資源である。利用者の VM をネットワークに接続するための、各種ネットワーク回線が引き込まれている必要がある。後述する管理サービスからの VM 実行リクエストを受け取った後に、共有ストレージから OS イメージを取得し、VM を実行する。

**共有ストレージ** VM が使用する OS イメージが格納されるストレージである。分散配置されている全ホスティングリソースからアクセス可能な場所にある必要がある。OS イメージとしてはシステム管理者が用意した標準的なものだけでなく、利用者による登録も可能である。

**管理サービス** 利用者情報管理と、利用者からの VM・OS イメージ操作リクエストの受理、VM 実行・イメージ操作を司る。VM 実行要求に対しては、利用者が指定したサイトのホスティングリソースの中から 1 つホスティングサーバを選択し、そのサーバ上で VM を起動する。VM 停止要求が発行された場合には、VM 停止後、ホスティング用サーバから VM 関連データを全て消去する。OS イメージ操作に対しては、操作内容に対して、共有ストレージへのイメージの格納・取得・削除、属性情報の更新などを行う。

利用者が分散環境ホスティングサービスを利用する際、VM 起動から停止までの流れは以下になる。

- (1) 管理サービスに VM 起動を要求
- (2) 管理サービスは利用者の要求に基づき、VM を実行するホスティングサーバを選択
- (3) 選択されたサーバは共有ストレージから、利用者が指定した OS イメージを取得
- (4) ホスティングサーバ上で、利用者のアクセスキーや取得した OS イメージを用いて、VM を起動し、指定されたネットワークに VM を接続
- (5) 利用者は任意のタイミングで VM の OS イメージを共有ストレージに保存可能
- (6) 利用者が明示的に VM 停止命令をシステムに発効することで、VM は停止され、ホスティングサーバ上から関連データが消去される

#### 4. 分散環境ホスティングサービスの構築

分散環境ホスティングサービスの実装は、RENKEI-VPE (RENKEI: REsources liNKage for E-science, VPE: Virtual Private Environment)[10], [11] をベースに構築した。RENKEI-VPE は多拠点に分散配備された計算機・ストレージ資源を相互連携させたグリッドサービスをホスティングするために開発された分散仮想マシン管理システムである。VM をホストするホスティングサーバを拠点資源と

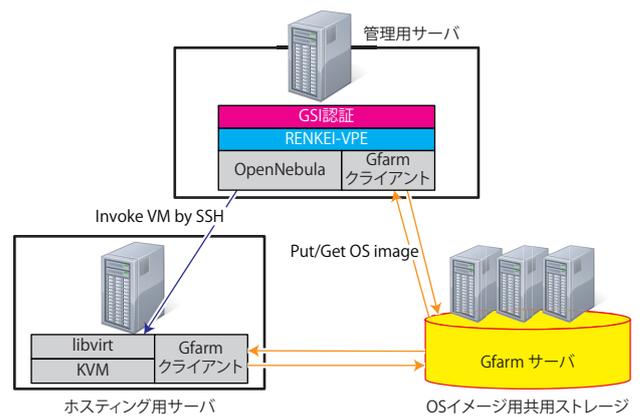


図 2 RENKEI-VPE の構成図

外部ネットワークの境界に設置し、その上での拠点資源と疎結合するグリッドサービスを VM として容易に実行可能なシステムとして設計されている。RENKEI-VPE は VM ネットワークの設定、起動、アクセスまでを提供し、VM への個別ソフトウェア設定は利用者が行う。RENKEI-VPE の主な特徴を以下に挙げる。

- 利用者が指定した拠点への指定した OS イメージを用いた VM 起動。VM 接続先ネットワークの指定も可能であり、マルチホーム VM 構築にも対応。
- VM の suspend/resume。VM 状態を OS イメージとして保存し、後の利用、他者との共有。
- 利用者毎の利用可能拠点、リソース量の制限。
- 利用者への IP アドレスの事前割当。

以上のような特徴を実現する RENKEI-VPE のアーキテクチャを図 2 に示す。RENKEI-VPE は 1 台の管理サーバ、1 台以上のホスティングサーバ、管理サーバとホスティング用サーバからアクセスできる 1 つの OS イメージ用共有ストレージからなる。管理サーバは SSH や GSI-SSH などを利用したりリモートアクセスをユーザに提供しており、管理サーバ上でアカウントを持つ者が RENKEI-VPE の各種操作を行える。RENKEI-VPE のシステム内部では、リモートサーバ上の VM 管理にはクラウド管理システム OpenNebula[12] を用いている。ホスティング用サーバでは、仮想マシン管理ライブラリ libvirt[13] インターフェースを経由して、KVM[14] により VM が実行される。管理サーバからの VM 操作命令、利用毎の情報 (SSH 公開鍵など) は ssh にて転送される。これらの VM で起動される、OS イメージは Gfarm<sup>\*1</sup> によって構成された、共有ストレージに保存されており、VM 起動時には各ホスティングサーバがストレージサーバより OS イメージをホスティング用サーバのローカルディスクにコピーしてから起動される。また、VM 利用終了時には、OS の状態を保存する

\*1 HPCI 共有ストレージも Gfarm で構成されているが、分散環境ホスティングサービス用として、独自に OS イメージ用の Gfarm ストレージ環境を構築している。そのため、HPCI 共有ストレージとは同一のシステムではない。

表 2 先端ソフトウェア運用基盤資源一覧 (平成 26 年 3 月時点)

参加機関	物理サーバ数	想定仮想計算機数
北海道大学	1	40 VM
東京大学	2	24 VM
東京工業大学	4	24 VM
九州大学	4	24 VM

必要がある場合には OS イメージ用ストレージに転送し状態が保存される。OS の状態を保存する必要がない場合は、VM 利用終了後、直ちに OS イメージを含む関連データは全て削除される。

## 5. 運用構成

平成 26 年 4 月より本格運用を開始する先端ソフトウェア運用基盤の運用構成について紹介する。図 3 に現在の先端ソフトウェア資源配置を示す。

先端ソフトウェア運用基盤の資源は、北海道大学、東京大学、東京工業大学、および九州大学の計 4 拠点に配置されている。表 2 に、先端ソフトウェア運用基盤の各機関に配置されたホスティングサーバの資源と、各サイトで起動できる最大の VM 数を示す。

先端ソフトウェア運用基盤の運用に当たっては、東京工業大学学術国際情報センターが、ユーザアカウントの作成やリソース (VM 数やネットワーク) の割り当て作業などの基本的なオペレーションを担当する。このことから、全ての管理サービス群を提供する管理用サーバについては、東京工業大学内に設置した。また、OS イメージを保存するストレージについても同様に東京工業大学内に設置されており、この共用ストレージより、利用者が選択した OS イメージが、各サイトのホスティングサーバに展開される。

各拠点に配置された資源は、NII が管理する SINET4 を用いて接続されている。大きな OS イメージの配布や、分散コンピューティングなどの研究に十分耐えるシステムにするため、各資源は基本的に 10Gbps 級の広帯域なネットワークで接続されている。また、全資源で統一的な運用を行うためや、各 VM のセキュリティ維持の観点から、SINET4 で提供されている L2VPN もしくは L3VPN の機能を用い、一貫したネットワークセキュリティを維持可能な L2/L3 ネットワークを構成している。このようなネットワーク環境を利用し、以下の 2 種類のネットワーク環境を VM に用意した。

- 完全にプライベートに閉じたネットワークであり、外部との通信はできないネットワーク
- プライベート IP アドレスが付与されるが、NAT Gateway を介し、外部への通信を可能にするネットワーク (ただし現在は東京工業大学で動作する VM にのみ提供)

上記の NAT 環境を実現するために、東京工業大学に NAT

Gateway を設置し、VM 環境下から外部への通信を可能にしている。加えて、VM 上に立ち上げた Web サーバを外部に公開する手段として、リバースプロキシサービスも提供している。

外部への接続経路を確保していることから、各 VM 上より、HPCI の共通のストレージである HPCI 共用ストレージにアクセスすることが可能である。分散環境ホスティングサービスを HPCI 共用ストレージと連携して用いることで、他の HPCI 構成機関のスーパーコンピュータと連携が可能である。たとえば、HPCI 上のスーパーコンピュータのプレ/ポスト処理に先端ソフトウェア運用基盤上の VM を利用することが可能である。

## 6. 今後の課題

先端ソフトウェア運用基盤の継続的なサービス提供と利用者の利便性向上のために、次に示す課題に取り組む。

### VM の外部ネットワークへの直接公開

現在の分散環境ホスティングサービスで提供する VM は、プライベートネットワーク上に展開されるため、NAT を介したインターネットアクセスのみをサポートしている。この結果、インターネット上から VM への直接アクセスを許していない。一般的な web サーバの公開に限定すれば、リバースプロキシサービスを介することで、インターネット上から VM へのアクセスが可能である。しかしながら、NAT やリバースプロキシを介したサーバへのアクセスは、利用可能なアプリケーションに制約を与える。利用者の利便性の向上のためには、利用者からの要求に応じて直接グローバル IP アドレスを VM に貸与できることが望ましい。現在の分散環境ホスティングは、システム上はグローバル IP アドレスを VM に貸与できる。しかし、グローバル IP を貸与するに当たってのセキュリティポリシーや利用条件などが制定されていない。加えて、グローバル IP は有限のリソースであり、これをどのような条件の場合に貸与するのとも条件が制定されていない。今後は、利用者グローバル IP アドレスを直接貸与する場合の問題点を整理し、何らかのルールを制定する必要がある。

### ユーザインタフェースの拡充

現在の分散環境ホスティングサービスは、管理サーバよりコマンドベースで VM を制御する。多くの利用場面では、コマンドベースでの制御で問題ないが、様々な利用者を想定し、容易かつ直感的に操作可能な Web ベースのインタフェースを用意したい。また、各 VM の現在の負荷やネットワーク使用状況などを簡単に確認できるシステムも上記システムで求められる。

### リソースの増強

現在のホスティングサーバは、4 拠点で合計 11 台の物理サーバで構成されている。この環境下では最大でも 112 インスタンス程度の VM しか起動できない。利用者の利便



図 3 先端ソフトウェア運用基盤概要図

性の確保やシステム障害に備えるために、ホスティングリソースの増強を行う必要がある。

### 利用者の獲得

先端ソフトウェア運用基盤は、HPCIの中で運用開始する最も新しいシステムであり、既存のスーパーコンピュータと異なり認知度が低い。また、HPCユーザにとってホスティングサービスのようなサービスは馴染みが薄く、実際に応用可能なアプリケーションを持っていた場合でも、活用事例が見出せないことも考えられる。計算科学を進展させるためにも、本システムの活用例と共に積極的な広報活動が必要である。

## 7. おわりに

本稿では、平成26年4月よりHPCIで本格運用を開始する先端ソフトウェア運用基盤の設計と構築及び運用について紹介を行った。先端ソフトウェア運用基盤は、基盤センター群が保有する既存のスーパーコンピュータの問題を補完するため、計算資源を仮想計算機の形で提供する第3の資源である。先端ソフトウェア運用基盤は各組織で個別管理されているホスティングサービスを集約し、特に利用者への広域分散環境提供のためのシステムを提供することを目的とする。先端ソフトウェア運用基盤を活用することで、HPCI利用者の利便性の向上や計算科学の発展が期待される。

謝辞 HPCI先端ソフトウェア運用基盤を構築・運用開始にあたり、御議論頂いた「HPCI連携サービス運営・作業部会」関係者の皆様に感謝いたします。

### 参考文献

[1] 一般社団法人 HPCI コンソーシアム : <http://www.hpci-c.jp/>.  
[2] 国立情報学研究所 : SINET4 学術情報ネットワーク, <http://www.sinet.ad.jp/>.  
[3] HPCI 運用事務局 : <https://www.hpci-office.jp/>.  
[4] 滝澤真一朗, 棟朝雅晴, 宇野篤也ほか : 広域分散環境を提供する HPCI 先端ソフトウェア運用基盤の設計, 情報処理学会研究報告. [ハイパフォーマンスコンピューティ

ング], Vol. 2011, No. 68, pp. 1-7 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008583424/>) (2011).  
[5] Shibboleth: <http://shibboleth.net/>.  
[6] Welch, V., Siebenlist, F., Foster, I. et al.: Security for Grid services, *High Performance Distributed Computing, 2003. Proceedings. 12th IEEE International Symposium on*, pp. 48-57 (online), DOI: 10.1109/HPDC.2003.1210015 (2003).  
[7] 合田憲人, 東田 学, 坂根栄作ほか : 高性能分散計算環境のための認証基盤の設計, 情報処理学会論文誌. コンピューティングシステム, Vol. 5, No. 5, pp. 90-102 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009464397/>) (2012).  
[8] 實本英之, 建部修見, 佐藤 仁, 石川 裕 : 広域分散環境を提供する HPCI システムソフトウェア基盤の設計概要と共有ストレージ構築, 情報処理学会研究報告. [ハイパフォーマンスコンピューティング], Vol. 2011, No. 67, pp. 1-6 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008583423/>) (2011).  
[9] Tatebe, O., Hiraga, K. and Soda, N.: Gfarm Grid File System, *New Generation Comput.*, Vol. 28, No. 3, pp. 257-275 (2010).  
[10] 滝澤真一朗, 松岡 聡, 友石正彦, 佐藤 仁, 東田 学 : Point-of-Presence 連携による e-サイエンス分散環境, インターネットカンファレンス 2011 (2011).  
[11] Takizawa, S., Matsuoka, S., Munetomo, M., Kobayashi, T. and Jitsumoto, H.: A Virtual Machine Hosting System on e-Science Cyberinfrastructure, *The 1st International Workshop on Cloud Computing and Applications (IWCCA 2012)*, Hong Kong (2012).  
[12] Sotomayor, B., Montero, R. S., Llorente, I. M. and Foster, I.: Virtual Infrastructure Management in Private and Hybrid Clouds, *IEEE Internet Computing*, Vol. 13, No. 5, pp. 14-22 (online), DOI: 10.1109/MIC.2009.119 (2009).  
[13] libvirt The virtualization API: <http://libvirt.org/>.  
[14] Kivity, A., Kamay, Y., Laor, D. et al.: kvm: the Linux Virtual Machine Monitor, *Proceedings of the Linux Symposium*, Vol. 1, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 225-230 (online), available from (<http://linux-security.cn/ebooks/ols2007/OLS2007-Proceedings-V1.pdf>) (2007).