

# HPCとビッグデータ・AIを融合する グリーン・クラウドスパコンTSUBAME3.0の概要

松岡 聡<sup>1</sup> 遠藤 敏夫<sup>1</sup> 額田 彰<sup>1</sup> 三浦 信一<sup>1</sup> 野村 哲弘<sup>1</sup> 佐藤 仁<sup>2</sup> 實本 英之<sup>1</sup>  
Aleksandr Drozd<sup>1</sup>

概要：東京工業大学では、2017年8月よりスーパーコンピュータ TSUBAME3.0 の運用を開始する。TSUBAME3.0 は半精度以上で 47.2PFlops の理論演算性能を持ち、従来型 HPC に加えてビッグデータ・AI など幅広いワークロードを処理する日本最大級のスパコンとなる見込みである。また、高密度化と省電力化を追求し理論 PUE 値 1.033 を実現する。本報告では、TSUBAME3.0 のアーキテクチャを紹介し、いままでの TSUBAME シリーズにおける課題とそれを解決するための運用方針について述べる。

## 1. はじめに

東京工業大学学術国際情報センター（以下、「本センター」という）では「みんなのスパコン」を合言葉とし、使いやすさと高性能を両立したスーパーコンピュータ TSUBAME シリーズを構築・運用している。2006年に導入された TSUBAME シリーズの初代である TSUBAME1.0 以来、TSUBAME は学内外で約 2,000 名のユーザに利用されるシステムとなっている。2010年に導入された TSUBAME2.0 では、TSUBAME1.2 で部分的に導入された GPU アクセラレータを本格的に導入することで、消費電力を抑えながらも約 30 倍の性能向上を実現した。これにより Greenest Production Supercomputer in the World の認定を受けた。TOP500 4 位（2010 年 11 月時点）となる性能により、樹枝状凝固成長シミュレーションで 2 ペタフロップスを実現し ACM Gordon Bell Prize を受けるなど、大規模実アプリケーションにおいても実績をあげている。2013 年に TSUBAME2.0 の GPU 部を K20X に更新した TSUBAME2.5 では、理論最大性能が 5.6PF に達した。これらの TSUBAME の後継機となる TSUBAME3.0 は 2017 年 8 月より稼働を開始する予定である。TSUBAME3.0 は同年 1 月に日本 SGI 社による提案に決定し、本センターと日本 SGI 社および関連各社は協力し稼働開始に向けた準備を進めているところである。

TSUBAME3.0 はこれまでのスパコンが対象としてきた

<sup>1</sup> 東京工業大学  
Tokyo Institute of Technology

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

HPC 分野のみならず、ビッグデータや AI などの処理基盤への活用を期待されている。SGI ICE XA を基にカスタマイズされた 540 台の計算ノードに搭載される CPU は 1,080 基、GPU は 2,160 基となり、理論最大性能は倍精度で 12.15 ペタフロップス、半精度（以上）で 47.2 ペタフロップスになる。半精度は 16bit で表現される浮動小数点数であり、ビッグデータや AI などの分野で活用が期待されている。この半精度の演算は TSUBAME3.0 に搭載する GPU アクセラレータでハードウェア実装されている。各計算ノードには容量 2TB の NVMe 対応 SSD が搭載され、合計で 1.08TB の容量は今後のビッグデータ解析基盤に活用されることが期待される。高速ストレージも容量 15.9PB、データ転送速度 150GB/s と強化されており、今後増大するビッグデータ処理基盤での活用が期待される。

最新の GPU を搭載する TSUBAME3.0 は優れた省電力性を持っている。144 台の計算ノードを使用して HPL ベンチマークの性能測定を行った。電力効率に最適化したパラメータ設定では 1.998PFLOPS の性能を 141.6kW で達成し、14.11GFLOPS/Watt の電力効率で 2017 年 6 月の Green500 List [1] で世界第 1 位に認定された。

システムの冷却方式も効率化している。TSUBAME2.0/2.5 の間接水冷および TSUBAME-KFC の液浸・温水冷却等の経験より、冷却塔の使用による省電力性と、主要な熱源である CPU と GPU のみを直接水冷、他のコンポーネントを間接水冷とすることによる高い安定性とメンテナンス性を実現する。

本稿では、TSUBAME3.0 のシステム概要を示し、今後の運用方針について報告する。

## 2. TSUBAME3.0 の構成

### 2.1 計算ノード

TSUBAME3.0 は 540 台の計算ノードがあり、その全ての構成は同一である。各ノードは TSUBAME2.0 と同様に、最新の CPU や GPU アクセラレータ、大容量メインメモリ、高速なネットワークインターコネクタ、高速な SSD 等から構成される。CPU は Intel Xeon E5-2680 V4 Processor (Broadwell-EP, 14 コア, 2.4GHz) を 2 基搭載し、DDR4-2400 ECC REG DIMM 32GB モジュール 8 枚により容量 256GiB、バンド幅 154GB/s となる。GPU には NVIDIA Tesla P100 for NVLink-Optimized Servers (16GB HBM2@732GB/s, 5.3TFLOPS@FP64, 10.6TFLOPS@FP32, 21.2TFLOPS@FP16) を 4 基搭載する。TSUBAME1.2 で導入した Tesla S1070(GT200), TSUBAME2.0 の Tesla M2050(Fermi), TSUBAME2.5 の Tesla K20X(Kepler) に引き続き 4 世代目となる。ネットワークインターコネクタは Intel Omni-Path Architecture の Host Fabric Interface(HFI) を 4 基搭載し、ノードあたり片方向 400Gbps, 双方向 800Gbps のインジェクションバンド幅を持つ。各ノードには 2TB の大容量 SSD が搭載され、NVMe サポートにより高速なアクセスが可能である。特にネットワークインターコネクタと SSD はビッグデータや AI 分野での処理の高速化に重要な要素である。

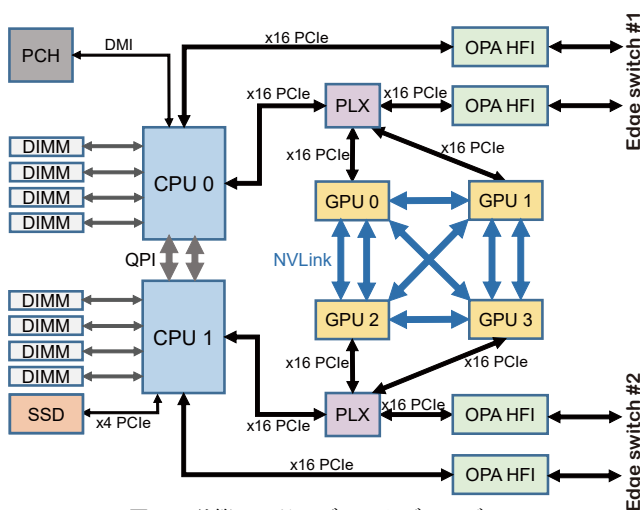


図 1 計算ノードのブロックダイアグラム

図 1 に TSUBAME3.0 の計算ノードのブロック図を示す。ノード内の各プロセッサ数が偶数であり、上下でほぼ対称な構造である。PCI-Express インターフェイスは Gen3 であり、1 レーンあたり片方向 1GB/s の転送速度を持つ。Broadwell EP が持つ PCI-Express レーンは 40 であり、16 レーンが Omni-Path HFI に、16 レーンが PLX の PCI-Express スイッチ経由で 2 基の GPU と Omni-Path HFI に接続される。残りの 8 レーンは 4 レーンずつ、SSD

の接続に用いられる。2CPU で計 4 スロット装着可能であるが、そのうちの 1 スロットのみ SSD が装着されている。TSUBAME3.0 に搭載される Tesla P100 GPU は SXM2 モジュール版であり、20GB/s のデータ転送速度を持つ NVLink をそれぞれ 4 リンク備え GPU 間の直接データ転送に使用される。

表 1 は TSUBAME2.5 と TSUBAME3.0 の計算ノードの比較である。値は全て理論値である。GPU は約 4 年前に更新されているにも関わらず GPU 性能の進化の速さにより大きく向上しており、特に半精度性能が際立つ。容量およびバンド幅の系統はビッグデータ処理に重要であるため大幅に増強されている。

### 2.2 インターコネクタ

計算ノード、各種ストレージ、各種管理ノード等は Intel Omni-Path Architecture で構成されるネットワークで相互接続されている。特にバンド幅が要求される計算ノード群はフルバイセクションバンド幅 Fat-Tree ネットワークで接続されている。階層は Edge スイッチと Director スイッチの 2 階層である。計算ノードは 9 台毎にシャーンに格納され、各シャーンには Edge スイッチを 2 台格納している。各 Edge スイッチは計算ノード 9 台からの内部リンクが計 18 本、さらに 3 台の Director スイッチへ計 18 本の光ファイバーのリンクが接続されている。

スーパーコンピュータにおける大規模計算では、ノードのインジェクションバンド幅だけではなく、システム全体のネットワークポロジが大きな影響を与える。TSUBAME3.0 では TSUBAME2.0 に引き続き、フルバイセクション・ファットツリーと呼ばれるトポロジーを用いている。本トポロジーの特徴として、ネットワークに接続する全ポートの任意の組み合わせにおける通信路が理論的には重複なく接続することが可能であり、ネットワークの特定箇所の通信が他の通信の性能に影響を与えないという点があり、アプリケーションおよび利用ノード数・通信形態が多様である大学のスパコンにとって有利な接続形態である。TSUBAME2.0/2.5 では、通信経路表が固定であるスタティックルーティングを用いているため、実際には通信の組み合わせによってスイッチ間ネットワークの同一経路を重複して利用することによる性能劣化が見られた [2]。TSUBAME3.0 では、通信経路の混雑状況に応じて動的に通信経路を選択するアダプティブルーティングを用いるため、このような問題が解消されると期待している。

### 2.3 ストレージ

#### 2.3.1 グローバルストレージ領域

スーパーコンピュータにとって、巨大なデータを蓄え、高速にアクセスできるストレージは必要不可欠な要素である。特に TSUBAME2.5 では、全計算ノードから等しく

表 1 TSUBAME2.5 と TSUBAME3.0 の計算ノード比較

指標	TSUBAME2.5	TSUBAME3.0	倍率
CPU のコア数×動作周波数 (GHz)	35.16	72.8	2.07
CPU のメモリ容量 (GiB)	54	256	4.74
CPU のメモリバンド幅 (GB/s)	64	153.6	2.40
GPU の CUDA コア数	8,064	14,336	1.78
GPU の FP64(TFLOPS)	3.93	21.2	5.39
GPU の FP32(TFLOPS)	11.85	42.4	3.58
GPU の FP16(TFLOPS)	11.85	84.8	7.16
GPU のメモリ容量 (GB)	18	64	3.56
GPU のメモリバンド幅 (GB/s)	750	2,928	3.90
SSD の容量 (GB)	120	2,000	16.67
SSD READ(MB/s)	550	2,700	4.91
SSD WRITE(MB/s)	500	1,800	3.60
ネットワーク転送速度 (Gbps)	80	400	5.00

アクセス可能なグローバルストレージ領域を備え、これがユーザの利便性に大きく寄与した。TSUBAME3.0でもこれを踏襲し、全計算ノードから等しくアクセス可能なグローバルストレージを有する。TSUBAME3.0では障害範囲の局所化と運用の柔軟性確保のため、実行容量約5.3PBのファイルシステムを3セット用意した。実際に導入されたグローバルストレージを図2に示す。それぞれのファ



図 2 TSUBAME3.0 のストレージ

イルシステムは DDN SFA14KXE と EXAScaler によって構築された Lustre ファイルシステムで運用される。また、これらのストレージは高密度化を追求するために、日本国内でも稀な、45U ラックの最大密度実装であり、1 ラックあたり 5.3PB を実現している。これにより 1 ラックあたり 1.3 トンを超えることとなったが、本実装密度は 3.1 節に示す床耐荷重の強化により初めて実現できたものである。

### 2.3.2 スクラッチ領域

現在のスーパーコンピュータでは、ビッグデータ等のデータ処理において、大量のファイル I/O リクエストが発行される。これらの I/O リクエストを高速に処理でき

ることは、現在のスーパーコンピュータのワークロードにおいて重要になっている。グローバルストレージを用いたこれらの I/O は、大きなファイルサイズでなされることが一般的であるが、ワークロードの種類によっては、小さなファイルサイズの I/O リクエストを大量に発行される場合がある。I/O リクエスト数が増大すると、Lustre のような並列ファイルシステムでは MDS 性能が性能低下の要因となるとともに、これらの性能改善は難しい。これらの問題を解決するために、多くのスーパーコンピュータにおいて Burst Buffer と呼ばれるシステムが導入されている。しかしながら、現状の Burst Buffer 技術はコストパフォーマンスに欠けるため、TSUBAME3.0での導入は見送ることとした。しかしながら、多量のファイル I/O を効率的に処理するため、各計算ノードに装備された 2TB NVMe を BeeGFS [3] による BeeOND [4] を用い、ユーザに割り当てられたノードのみでグローバルスクラッチ領域を構築することとした。

## 3. ファシリティの整備

TSUBAME3.0 の導入に当たっては、高密度・高効率を目標とし、スーパーコンピュータだけではなく、基本的なファシリティの再整備も必要になった。特に、スーパーコンピュータが整備される情報棟は現代のデータセンター設備としては貧弱であり、目標を達成することが困難であった。また、本学として初めて旧システムとなる TSUBAME2.5 と TSUBAME3.0 の 2 台のスーパーコンピュータの平行運用を検討しているため、設置スペースや電力事情に大きな制約が生じた。これらの問題を解決するために、情報棟の改修を行った。また、世界最高レベルの冷却効率による運用コストの低減を目指し、スーパーコンピュータ調達時において冷却設備の条件を厳しくした。

### 3.1 サーバルーム

近年のスーパーコンピュータは、性能向上を実現するために床面積の拡大を必要としてきた。TSUBAME シリーズでは、システムの高密度化を進め床面積の削減に努めてきた。システムの高密度化は床面積の削減以外にも、電力効率・冷却効率の向上にもつながる。特に今回 TSUBAME2.5 を、保持したまま TSUBAME3.0 を整備するため、システム設置スペースの最小化は重要な課題であった。また、システムの高密度に加えて冷却効率の向上を考え、TSUBAME2.0 で導入した水冷システムや TSUBAME-KFC での油浸冷却の検証を踏まえ、TSUBAME3.0 では何らかの水冷システムの導入を検討していた。この結果、1 ラック当たりの積載重量が約  $1t/m^2$  にもなることが想定された。厳しい床耐荷重条件を満たす部屋が情報棟になかったこと、TSUBAME2.5 の平行運用を予定していたことを踏まえ、TSUBAME2.5 のストレージを設置していた部屋を以下の条件のもとサーバールームを改修した。

- 今後の積載荷重の増大に備え、部屋全体として 100t の荷重に耐えうる床とする
- 床耐荷重の最大化とシステムコストの最適化のため、フリーアクセスフロアではなく、直接スラブの床とし、配線・配管を天井部に設置する
- 可能な限り空間を大きくするため、既存の天井部を撤去する

これらの改修を行い、図 3 に示す  $145m^2$  ほどの床面積のサーバールームを整備した。最終的に、このような高密度化対策によって、ラックの重量による設置制限が大幅に緩和し、図 4 に示すように、TSUBAME3 では既存の TSUBAME2.5 の計算ノード設置スペースに対して半分以下の床面積でストレージを含むすべての資源を配置できたばかりでなく、将来的な拡張の余地を十分に確保することが可能になった。

### 3.2 電源設備

高い電力使用効率を実現するため、TSUBAME3.0 では配電電圧の高圧化を検討し、3 相 4 線式の 415V もしくは 3 相 3 線式の 480V の 2 種類を検討した。一般的には、高電圧であれば配電ロス小さく、かつ配線コストの低下につながる。しかしながら、導入する設備は高電圧仕様のスーパーコンピュータ本体だけでなく、管理用の一般的なサーバやネットワーク機器も導入する必要がある。そのため、単相電圧として 240V を容易に取り出すことができる 3 相 4 線式の 415V を選択した。単相 240V が利用できるのであれば、ほぼすべての IT 機器が対応しており、調達コストの低減を図ることができる。これらの検討を踏まえ、設備を施工する本学施設運営部との調整やトランス等の導入コストおよび将来の利用計画検討の結果、受電容量 2MW の 3 相 4 線 420V の電源設備を整備することになった。最終的

に TSUBAME3.0 ではスーパーコンピュータ本体で 1MW 弱となり、3.1 節に示した、拡張スペースを用い、将来拡張に余裕が生じた。

### 3.3 冷却設備

スーパーコンピュータの運用コストを低減するために、運用コストの大きな割合を占める電力使用量を削減する必要がある。このためにはスーパーコンピュータ本体の電力低減も重要であるが、冷却設備の電力低減も重要になる。例えば、TSUBAME2 における理論的な PUE は 1.28 であり、この場合全電力に占める冷却電力は、約 22% にもなる。TSUBAME の場合年間電力利用料金が 1 億円以上となるため、2,000 万円以上が冷却で消費されているといえる。TSUBAME3.0 では、TSUBAME2.0 で導入した水冷システムの運用経験や、TSUBAME-KFC での油浸冷却の検証を踏まえ、スーパーコンピュータ本体の冷却として、クーリングタワーを用いたフリークーリングを年間を通じて行うシステムの導入に至った。これにより TSUBAME3.0 の理論的な PUE は 1.033 となり、TSUBAME2.5 に対して約 0.25 改善することとなった。

## 4. 運用

TSUBAME シリーズは、これまでパソコンや小規模クラスターで計算をしていたユーザも、気軽にスパコンを利用できる可用性の実現を目標としてきた。TSUBAME3.0 においても、これまでの運用を継承しつつ、さらに可用性を高めるため、以下のようなサービスの提供を行う予定である。

### 4.1 グランドチャレンジ制度

TSUBAME2.0/2.5 では、ピアレビューにより選抜されたユーザグループ(学内・学外)に計算資源を提供する TSUBAME グランドチャレンジ大規模計算制度 [5] を運用し、これまでに延べ 20 のグループに対して TSUBAME2 の全計算ノードを 12~24 時間にわたって提供、14 のグループに対して TSUBAME2 の 1/3 の計算ノードを 1 週間にわたって提供した。TSUBAME3 においても同様の大規模実行機会を設ける予定である。

### 4.2 コンテナ技術を用いたノードの動的な分割

TSUBAME2.0/2.5 では全体の約 1/3 のノードにおいて VM 技術を用いて計算ノードを GPU 部分と CPU 部分に分割し、それぞれを仮想的に別の計算ノードとして資源提供することで、GPU を中心に利用し CPU はさほど利用しないユーザや、GPU を利用せず CPU のみを利用するユーザの需要に応じてきた。しかしながら、VM およびスケジューラの資源分割が固定であるため、利用者の需要と合致しない資源が一時的に遊休化するなど、資源利用率の面で課題があった。また、当時の VM 技術の制約上、性





図 3 Tsubame3.0 サーバルーム (左: 施工前, 右: 施工後)

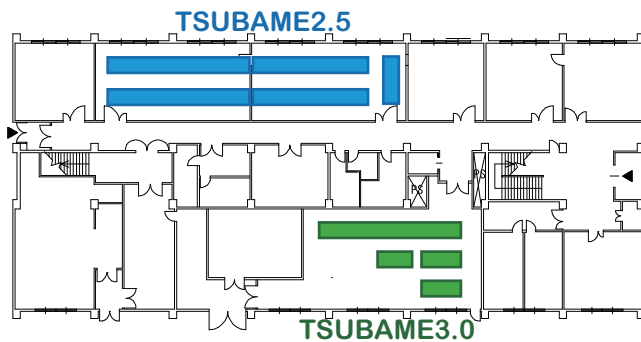


図 4 Tsubame3.0 および Tsubame2.5 の配置

能を犠牲にすることなく GPU を仮想化することが出来なかったため、GPU ジョブはベアメタルノードで実行しつつ、そのノードの中に CPU ジョブのための VM を作成する形をとる必要があり、ノード内の 3 基の GPU を分割することはできなかった。

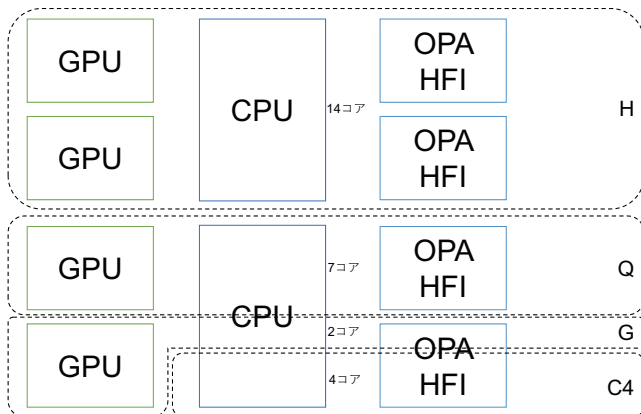


図 5 Tsubame3.0 計算ノードの資源分割イメージ

Tsubame3.0 では、コンテナ技術のひとつである Docker を用いて、すべての計算ジョブをコンテナの内部で起動することを計画している。Docker コンテナからは GPU および Omni-Path HFI に直接アクセスすることが可能であり、またコンテナから利用できるデバイスを制限することもできるため、Tsubame2.5 よりも柔軟に資源の分割が可能である。例えば図 5 に示すように、ノード内の一部の

GPU のみを切り出すようなノードの分割を行うことができる。さらに、スケジューラと連携してコンテナの作成を動的に行うことにより、Tsubame2.5 で行われていた静的なパーティショニングを行わず、需要に応じたノードの切り出しが行えるようになる見込みである。

#### 4.3 コンテナ技術を用いたシステムイメージの分離

Tsubame2.0/2.5 は当初計画を上回り、6 年以上にわたって運用が行われてきた。計算ノードで動作する OS ディストリビューションは SUSE Enterprise Linux 11 SP3(2014 年に更新) であり、2017 年現在ではカーネルおよび各種ライブラリのバージョンが古く、Tsubame 標準のコンパイラ・ツールや各種ライブラリではビルドできないアプリケーションが AI 分野を中心に出現しており、個別に新しいバージョンのソフトウェアをインストールして対応する [6] ことをユーザに強いている。また、個別にセキュリティパッチ適用等は当然行っているものの、システムイメージを古い状態に保つことはセキュリティの観点からも望ましくない。システムイメージを頻繁に更新できない要因は複数あるが、システムライブラリ更新に伴うアプリケーションの互換性喪失、特に ISV アプリケーションの動作検証コストが膨大となることがあげられる。Tsubame3.0 では、Docker を用いることで計算ジョブ毎に用いられるシステムイメージと、Tsubame3.0 本体のシステムイメージを分離することができる。このため、検証済みの ISV アプリケーション実行用イメージや、最新のライブラリがインストールされたイメージなど、ユーザの需要に応じたシステムイメージをジョブごとに選択して実行することができるようになる。また、過去のシステムイメージを保存することにより、ソフトウェアの更新が原因で再現実験が困難になるという問題も解消できる。セキュリティの問題から、ユーザが作成した Docker イメージを直接実行することは難しいが、ユーザの需要に合致するシステムイメージを複数提供することを計画している。

#### 4.4 資源のより効率的な分配

TSUBAME2.0/2.5においては、上記の静的なノード分割のほかに、予約利用の単位が1日(10:00~翌9:00)単位であることなど、計算資源の効率的な利用を阻害する要因が複数存在することが運用中にわかってきた。TSUBAME3.0ではこれらの経験をふまえて、予約利用の単位を1時間単位に細分化するなど、ユーザの利用形態にあわせた利用がより簡便となるようにする。また、ジョブスケジューラのバックフィリングをより効率的に行うために、TSUBAME2.5の運用期間中に課金計算式を変更した [7] が、これを継続して用いることで、資源の効率的な分配につとめる。

#### 4.5 アカウント申請のペーパーレス化・全国共同利用

学内ユーザに対し、TSUBAMEが提供するポータルwebページ(以下TSUBAMEポータル)を東工大ポータル(全学のポータルwebページ)と連携させたペーパーレスのアカウント申請などのサービスをTSUBAME2.5と同様に行う。また、国内の代表的な9つの大学計算機センターの一つとして、HPCIなどを通じて大学を縦断したアカウントサービスを引き続き提供する。

TSUBAME2.5においては、アカウントの属性(学内利用・TSUBAE共同利用・HPCIによる利用など)に応じて1個人に複数のアカウントを発行していたため、アカウントの使い分けをユーザに強いており、アカウント間のデータ共有の面でも難があったが、TSUBAME3.0では1個人1アカウントとして同一アカウントからそれぞれの属性に応じた利用を可能とする予定である。これにより実験のためのデータをアカウントごとにストレージに配置するなどの不便が解消される見込みである。

#### 4.6 計算ノード・ストレージの外部ネットワークとの接続

TSUBAME2.5までは、計算ノードが外部ネットワークから隔離されており、必要な実験データやプログラムは基本的に外部からSFTP等で送り込む必要があった。TSUBAME3.0では、計算ノードからの外部ネットワークへの接続を選択的に許可し、SINET5に100Gbpsで接続することにより、外部のストレージサービスや計算資源との連携をより行いやすくする。

#### 4.7 モニタリング情報の公開

TSUBAME2.5に引き続き、スケジューラ・ノード・電力のモニタリング情報や障害情報の公開 [8] を継続し、「見える化」を推進する。障害情報については、現在は人手による更新でCSVデータの提供を行っているものの、表記ゆれや非構造的記述により機械的・統計的処理には向かないデータであるという問題がある。TSUBAME3ではモニタリング情報や障害情報の統計的処理ができるよう、開示情報の構造化・オープンデータ化に努める。また、ユーザ

のジョブに課する情報についても、TSUBAMEポータルを通じて積極的に提供する。

#### 4.8 データ連携

4.6節に示したように、TSUBAME3.0ではSINET5に直結された広帯域なネットワークを有する。これらのネットワーク帯域を有効に活用し、TSUBAME3.0のグローバルストレージをNFSもしくはCIFSにより外部に直接公開することを検討している。

### 5. おわりに

本稿では、2017年8月に稼働開始する、TSUBAME3.0の概要について示した。TSUBAME3.0は、TSUBAME2.5で目指した低消費電力やクラウド技術の統合を踏襲しつつ、既存のHPC分野に留まらない、ビッグデータ解析やAIなどの応用分野にも利用できるシステムを目指している。

謝辞 TSUBAME3.0の設計には、東京工業大学学術国際情報センターが推進してきた文部科学省「スパコン・クラウド情報基盤におけるウルトラグリーン化技術」および「スマートコミュニティ実現のためのスパコン・クラウド情報基盤のエネルギー最適化の研究推進」、JST CREST(JPMJCR1303, JPMJCR1501)などのプロジェクトの研究成果が活用されている。

#### 参考文献

- [1] TOP500 Supercomputer Sites: Green500 List for June 2017, <https://www.top500.org/green500/lists/2017/06/>.
- [2] 野村哲弘, 遠藤敏夫, 松岡聡: TSUBAME2.0におけるMulti-rail InfiniBandネットワークの性能評価, 情報処理学会研究報告, Vol. 2012-HPC-137, No. 3, pp. 1-5 (2012).
- [3] Fraunhofer Center: BeeGFS - The Leading Parallel Cluster File System, <https://www.beegfs.io/>.
- [4] Fraunhofer Center: BeeOND: BeeGFS On Demand, <https://www.beegfs.io/wiki/BeeOND>.
- [5] 東京工業大学学術国際情報センター: TSUBAME グランドチャレンジ大規模計算制度, <http://www.gsic.titech.ac.jp/GrandChallenge>.
- [6] 東京工業大学学術国際情報センター: TSUBAME2.5 実験的サービス, <http://tsubame.gsic.titech.ac.jp/labs>.
- [7] 野村哲弘, 佐々木淳, 三浦信一, 遠藤敏夫, 松岡聡: TSUBAME2におけるスケジュール効率化への取り組みとユーザ動向の見える化, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-HPC-150, No. 2, pp. 1-7 (2015).
- [8] 東京工業大学学術国際情報センター: TSUBAME2.5 統合監視ポータル, <http://mon.g.gsic.titech.ac.jp/>.