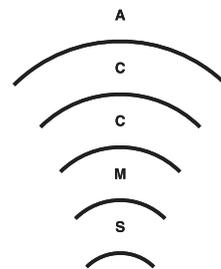


京都大学学術情報メディアセンター

Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University

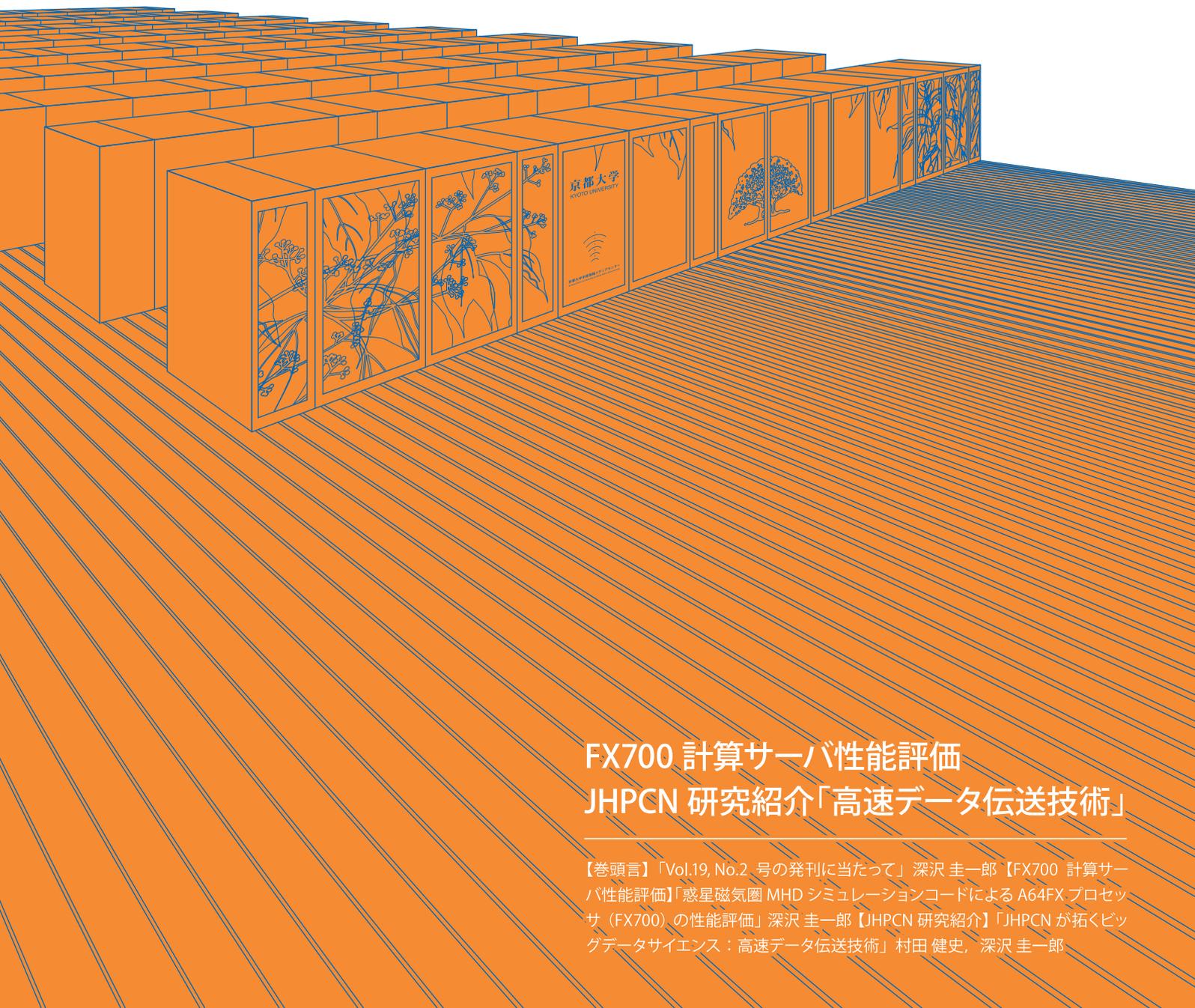


広報

全国共同利用版

Vol.19, No.2 2020

ISSN 1347-3581



FX700 計算サーバ性能評価 JHPCN 研究紹介「高速データ伝送技術」

【巻頭言】「Vol.19, No.2 号の発刊に当たって」深沢 圭一郎【FX700 計算サーバ性能評価】「惑星磁気圏 MHD シミュレーションコードによる A64FX プロセッサ (FX700) の性能評価」深沢 圭一郎【JHPCN 研究紹介】「JHPCN が拓くビッグデータサイエンス：高速データ伝送技術」村田 健史, 深沢 圭一郎

巻頭言

Vol. 19, No.2 号の発刊に当たって
京都大学学術情報メディアセンター
深沢 圭一郎

一年前にこの巻頭言を書いている頃には、想像もできませんでしたが、新型コロナウイルスの蔓延が続いており、更に悪い感染状況になってきた感さえあります。この状況に対して、正式運用前の富岳を利用した様々な計算が行われ、その結果をみなさんも目にしたことがあるかと思います。HPCI（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）では、富岳に代表される計算機資源提供機関を通じて、新型コロナウイルスに関連する研究に対し、特別に資源提供を行っており、本センターも資源を提供しています。大規模な計算機を持つ機関として、直接的ではないにしても、新型コロナウイルス感染症対策に協力できればと考えています。

このようなウイルスに関連する研究だけでなく、現在はあらゆる分野の研究開発において計算機が利用されています。スーパーコンピュータ（スパコン）といった強力な計算機は、その研究を飛躍的に発展させる基盤となっています。今回のような突発的な状況も考え、これまで以上にスパコンの整備・運用をしっかりと行っていく必要があると考えさせられました。

スパコンの整備という面では、Vol.18 No.2 では、次期スパコンに向けた評価として ARM アーキテクチャである ThunderX2 という CPU を利用した計算機の評価をしました。本号では、富岳に搭載されている ARM アーキテクチャを採用した A64FX という CPU の評価報告があります。富岳は一般にはまだ利用できませんが、FX700 や FX1000 という商用機が富士通からリリースされており、今回は FX700 を利用しています。京都大学学術情報メディアセンターでは、FX700 を次期スパコンシステムの更新に向けた評価機として 4 ノード導入しました。A64FX は、ThunderX2 と比べ、SIMD 演算の bit 数が 4 倍であり、また高いメモリバンド幅を有する HBM2 を搭載しているため、特徴が大きく異なります。この高いメモリバンド幅を持つメモリは、スパコンの主流ともなりつつあり、これにより実際のアプリケーション性能がどのようになるのかは、興味深いところです。評価では MHD コードという流体コードの一種を利用しており、計算ではシンプルな直交格子と差分法を利用しています。そのため似たようなコードを利用されている方には性能の想像が付きやすいと思います。また、ThunderX2 を含め、他の計算機との性能比較もありますので、相対的に性能を推定することにも役立つと思います。この FX700 は共同研究を通して、本センターのユーザの方にご利用いただけるように現在準備をしています。

また、本号では、本センターを利用している JHPCN（学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点）課題の研究成果を 1 つ紹介しています。この課題では、研究者らが開発した高

速伝送技術（HpFP）を用いて、様々な大学スパコンセンターや研究機関の間で、伝送実験を行っています。実験結果では、通常の TCP を介する伝送に比べて高い性能を実現できています。さらに、SINET 上で L2VPN を用いて各機関を繋ぐと、非常に高い転送性能が達成されました。これにより、データがどのスパコンセンターに置いてあっても、すぐにアクセスが可能のため、手元にデータを置いておく必要が無くなり、広域分散クラウドシステムの構築が期待されます。

これから、本センターではスパコンの本格的な更新準備に入っていきます。想定される計算機の評価だけでなく、機械学習系のアプリケーションや仮想化環境などの評価も行っていく予定です。これら評価の結果は、できる限り情報を公開していきますので、ご意見などありましたら、お知らせください。今後ともご利用、ご支援のほど、よろしくお願いいたします。

惑星磁気圏 MHD シミュレーションコードによる A64FX プロセッサ (FX700) の性能評価

深沢 圭一郎

京都大学 学術情報メディアセンター

1 はじめに

2 度の Top500 の 1 位を獲得し、Graph500 など様々なランキングでも 1 位を獲得した京コンピュータは、2019 年 8 月に 7 年間の運用を終えました。京コンピュータはその共用を HPCI (High Performance Computing Infrastructure) が行ったことにより、これまでにスーパーコンピュータ (スパコン) を利用していなかった科学計算アプリケーションだけでなく、企業においても利用されるなどスパコンを利用するアプリケーションの拡大に寄与してきました。また、京コンピュータの供用開始前には、想像もされていなかった機械学習の発展により、現在では機械学習がスパコン利用の大きな 1 分野になるなど、スパコンを利用するアプリケーションは、京コンピュータ完成前と現在では大きく変わってきており、スパコンに求められる性能も多様化してきています。

このような様々なアプリケーションの計算需要を満たすために、スパコンの CPU も京コンピュータ完成前とは大きく変わってきています。2012 年頃には京コンピュータと同じく 8 コア CPU であった Xeon (SandyBridge 世代) はプロセス微細化技術やリーク電流の問題もあり、周波数の向上が難しくなった結果、コア数の増加 (メモリアダプティブ) や同時演算数の増加によって、CPU 性能の向上を実現するようになりました。例えば、現在の Xeon (Skylake 世代) であれば、2.5GHz 程度の周波数に 20 コアを超えるコア数 (ノード当たり 40 コア超) となり、AVX-512 による 512bit の SIMD 計算、FMA (積和演算) ×2 により、クロックあたりの同時演算数が 32 となっています。この同時演算回数の増加により 1.5TFlops 以

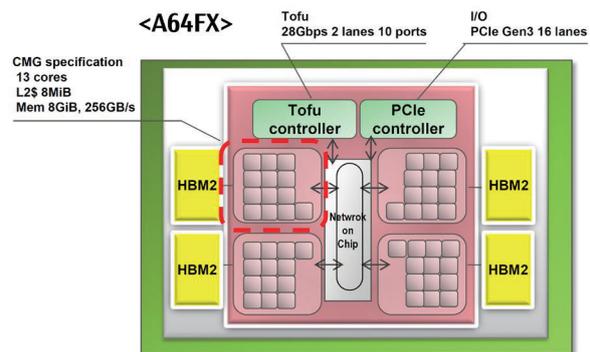


図1 A64FXの構造[4]

上の性能を達成しています (京コンピュータの CPU である SPARC 64 VIIIfx の 10 倍以上)。また、京都大学学術情報メディアセンターのスパコンにも搭載されている Xeon Phi KNL では、1.5GHz 程度の周波数に 60 を超える CPU コアに加え、同時演算数が 32 であり、理論性能は 3TFlops に達しています。

一方、新しい HPC 向け CPU として ARM アーキテクチャの利用が近年増えてきました。モバイル系で主に利用されている ARM プロセッサは、その主な用途のため、計算性能を制限することで消費電力を下げているため、HPC のような高性能計算には利用されていませんでした。このような中 Cavium (現 Marvell) が、計算性能を高めたサーバ向け ARM プロセッサ ThunderX2 をリリースしました。ThunderX2 は 32 コアとコア数が多い一方で同時演算数が 8 のため、CPU の理論性能が約 1TFlops と Skylake 世代の Xeon と比べても半分近く低くなっています。しかしながら、ベンチマークや実アプリケーションの性能測定結果を見ると、ThunderX2 は、Skylake 世代の Xeon の 80% 程度の性能と報告がなされており [1、2]、

HPC分野でも十分に利用可能なCPUとなっています。本センターにもこのThunderX2は次期システムの評価機として導入されており、その性能評価が本広報のVol.18 No.2で紹介されています。

このような中、京コンピュータの後継機である富岳ではCPUアーキテクチャとしてこれまでのSPARC64Vではなく、ARMアーキテクチャを採用したA64FXが搭載されています。A64FXでは、HPC向け拡張であるSVE (Scalable Vector Extension) により、同じARMプロセッサであるThunderX2と比べて高いSIMD演算が可能となっています (Skylake XeonやXeon Phi KNLと同じSIMD幅)。また高バンド幅メモリであるHBM2を搭載するなど、高性能計算に最適化されたCPUとなっています。2020年12月現在では、富岳の運用開始前のため、一般的にはまだ利用ができません。しかし、富岳と同じCPUを採用した商用計算機であるFX1000とFX700が富士通からリリースされており、A64FXの利用が可能となっています。

そこで、本稿ではこれまでに様々なスパコンで性能評価を行ってきた電磁流体力学 (MHD) シミュレーションコード[3]を用いて、FX700に搭載されているA64FXの性能評価を行いました。MHDシミュレーションは通常の流体シミュレーションに電磁場の効果を考慮したシミュレーションになっているため、本性能評価の結果は流体系のアプリケーションに広く応用できます。また、これまでに評価してきた計算機システムの性能と比較することで、現実的なA64FXの計算性能を見積もることが可能になります。

また、このFX700は令和3年度中に本センターの共同研究として、スパコン利用者にご利用いただけるように準備をしています。

2 A64FX 計算機システム FX700

本稿で利用するA64FX搭載計算機システムは、次世代のスパコンシステムの評価を目的として、2020年3月に試験的に京都大学学術情報メディアセンターに導入されたシステムであり、4ノードのFujitsu PRIMEHPC FX700により構成されています。FX700は、富岳の商用機であるFX1000と異なり、次の違いがあります。ノード間通信が

表 1 A64FX 搭載計算機システムの諸元

System		Fujitsu PRIMEHPC FX700
Node	CPU	A64FX × 1/node
	Num. of core	48 cores /CPU
	Frequency	1.8 GHz
	Cache	L1 : 64 KB/core
		L2 : 8 MB/CMG
	SIMD	SVE 512bit
	Rpeak	2,765 GFlops /node (DP)
	Memory	HBM2 32 GB /node
	Bandwidth	1,024 GB/s /node
B/F	0.37	
Num. of node	4 nodes	
Rpeak	11 TFlops	
Node comm.	InfiniBand EDR 100 Gbps	

Tofu D (FX1000) から InfiniBand (FX700) へ変更、水冷 (FX1000) から空冷 (FX700) へ変更、A64FXの周波数2.2GHz (FX1000) から1.8または2.0GHz (FX700) へ変更、アシスタントコアの有無 (FX700は無し)。本評価では、4ノードという少ないノード数の利用であり、並列性能より単ノード性能に注目しているため、これらFX1000とFX700との違いは周波数を除きほとんど影響がありません。

A64FXは図1に示されるような4つのCore Memory Group (CMG)から構成され、このCMG毎にHBM2やアシスタントコア (FX700では利用不可)が付随します。FX700では1ノードあたり1CPU、48コア (理論演算性能2,765GFlops)、32GBメモリ (バンド幅1024GB/s)となります。システムの詳細は表1に示してあります。

A64FXは、同時演算数が32であり、Skylake Xeon (Gold以上)やXeon Phi KNLと同等の同時演算数となっています。メモリバンド幅は、高バンド幅メモリであるHBM2を採用しているため、Xeonなどに比べて高く、理論演算性能とメモリバンド幅の比であるB/F値が0.37となっています。近年のXeon搭載計算機ではB/F値が約0.1、ThunderX2では0.30となっています。メモリ参照が多いアプリケーションの場合、B/F値が実効効率を制限するため、注意が必要です。

3 MHD シミュレーションコード

本評価で利用したMHDシミュレーションコードは、惑星磁気圏を解くために利用されています。太陽系では、太陽から太陽風と呼ばれるプラズマの風が常時吹き出しており、太陽系全体にそのプラズマが充満しています。この太陽風が惑星の固有磁場と相互作用することで、惑星磁場が変形し、磁気圏と呼ばれる領域が形成されます。磁気圏では、磁気嵐など様々な現象が起きており、その領域だけでなく、地上にも様々な形で影響を及ぼしています。このような現象は宇宙天気と呼ばれ、古くから研究が行われてきています。

このような宇宙プラズマ現象の中、グローバルなプラズマ構造である惑星磁気圏をシミュレーションする場合には、MHD 方程式が使用されています。MHD 方程式は以下のような形をしています。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\nabla \cdot (\mathbf{v}\rho) \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} &= -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \mathbf{J} \times \mathbf{B} \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -(\mathbf{v} \cdot \nabla) p - \rho \nabla \cdot \mathbf{v} \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})\end{aligned}\quad (1)$$

上から、連続の式、運動方程式、圧力変化の式(エネルギーの式)、最後に磁場の誘導方程式となります。簡単に言えば、電磁場を考慮した流体力学方程式です。詳しい説明は参考文献を参照してください[5]。

この MHD 方程式を解く数値計算法としては、Modified Leap Frog (MLF) 法[3、6]という数値計算法を利用し、Fortran により実装しています。本評価での並列化には MPI のみを使用しています。並列化手法としては 3 次元空間を分割する領域分割法を用いています。領域分割には、1 次元、2 次元、3 次元分割が考えられ、本評価ではこれらすべての評価を行いました。

一般的に B/F 値の低いスカラ CPU で性能を出すためにはキャッシュの有効活用が重要です。キャッシュの量や、一度にキャッシュに格納するデータ量は CPU アーキテクチャ毎に変わるため、最高のパフォーマンスを出すにはそれぞれの調整

が必要となります。MHD シミュレーションにおいては、物理変数がプラズマ密度、速度 3 成分、圧力、磁場 3 成分の計 8 変数あります。そのため、配列を $f(x, y, z, m)$ と定義し、 $m=8$ としています。数値計算時に同じ場所の物理変数を何度も使うことになるため、一般に Fortran では、 $f(m, x, y, z)$ と定義した方がキャッシュヒット率は上がることがわかっています[7]。しかしながら、近年の Xeon 系 CPU のように SIMD 幅向上に伴いベクトル化が性能向上にとって重要な機構であるため、更に配列を $f(x, m, y, z)$ と $f(x, y, m, z)$ と定義した場合の性能評価も行いました。

4 計算性能評価

FX700 では、Fortran コンパイラと MPI ライブラリとして Fujitsu Software Compiler Package V1.0L10 を利用し、性能評価を行いました。Fujitsu Fortran では、コンパイルオプションに `-Kfast` (ターゲットマシン上で高速に実行させることを指示する) を利用しています。計算サイズは基本的にはプロセス当たり、64MB (100³ グリッド) となり、Weak scaling の評価を行いました。計測は 5 回行い、その平均値を評価に利用しています。

図 2 に FX700 を利用して、3 種類 (1 次元、2 次元、3 次元) の領域分割を行った MHD コードの評価結果を示します。前述のように、プロセス当たりの計算量がどの領域分割においても $(x, y, z) = (100, 100, 100)$ となるように設定し、ここでは主に領域分割による性能の違いを見ました。並列化としては、Flat MPI を利用しています。まず、1 次元領域分割が最も性能が高く、3 次元領域分割の性能が最も低い結果となっています。ThunderX2 の性能評価では、1 次元領域分割と 2 次元領域分割の差はそれほどありませんでしたが (実効効率で 1%未満の差)、A64FX では差が大きくなっており、利用コア数によっては、3 次元領域分割と同程度の性能となっています。この評価では、プロセス毎の通信するデータ量は全く同じであり、違いは Halo 通信に伴うパック・アンパック処理とプロセスにおける通信相手の数となり、通信の負荷が見えてくる評価となっています。現代のスパコンは富岳も含め大並列実行を行うた

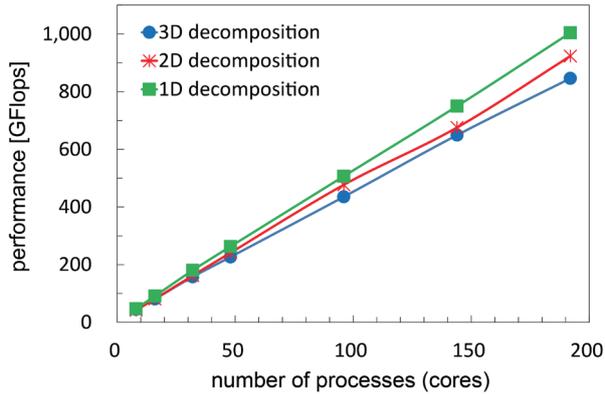


図2 3種類の領域分割によるMHDコードの性能

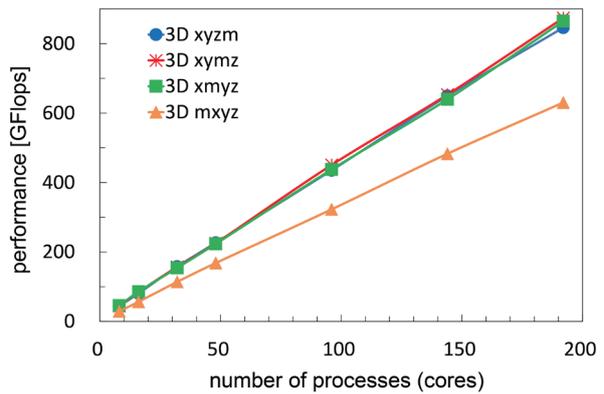


図3 配列並びが異なる場合のMHDコードの性能

め、1次元領域分割を選択することは現実的ではありませんが、今回のように通信による負荷が高次元の領域分割で大きい場合は、3次元領域分割よりも2次元領域分割を選ぶ方が高い実行性能を実現できる場合があります。

実際の性能としては、192プロセスを利用した場合、1次元領域分割で1,004GFlops（実行効率9.1%）、2次元領域分割で923GFlops（同8.4%）、3次元領域分割で846GFlops（同7.7%）となっている。

次に、配列並びによるMHDコードの性能変化を評価しました。図3は3次元領域分割において、前述のように配列の並びが異なる4つの場合にMHDコードがどのような性能になったかを示しています。図中の3D xymzは、図2の3次元領域分割の結果と同じであり、xyzmは配列の並びを表しています（これは $f(x, y, z, m)$ を意味する）。図から明らかにmxyzの性能が、他の配列並びと比べて低くなっています。このmxyzは京コンピュータでは最も性能が高い結果を示していました[7]。一番性能が高くなった配列並びはxymzであり、873GFlops（実行効率7.9%）となっています。ほぼ同じ性能で2番目となったのはxmyzであり、865GFlops（同7.8%）、3番目がxyzmとなりました。物理変数を示すmが最内にある、いわゆるAoS（Array of Structure）形式は、これまでの研究結果によりキャッシュヒット率が高くなる配列構造であり[7]、京コンピュータには最適でしたが、高SIMD計算が必要なA64FXでは、ベクトル計算に効率的なSoA（Structure of Array）形式が重要であり、二つを合わせたxymzやxmyzの性能が高くなっていると考えられます。

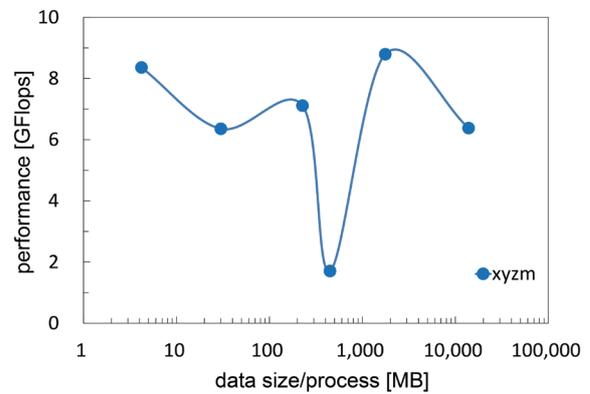


図4 異なる配列サイズにおけるMHDコードの性能

最後に、計算に利用する配列のサイズによるFX700の性能を評価しました。これは非並列でxyzmの配列並びを利用し、基本的な性能を見えています。図4では、1プロセスでプロセス当たりの総配列利用サイズ（ワーク配列を含む）を4.2~13,878MBと変化させた場合のMHDコードの性能を示しています。A64FXのL2キャッシュサイズは8MB/CMGであり、最小の配列サイズではL2のサイズを下回っています。最も性能が高いサイズは1,760MB（計算サイズは $200 \times 200 \times 200$ ）であり、8.79GFlops（実効効率15.3%）となり、オンキャッシュの4.2MB（計算サイズは $25 \times 25 \times 25$ ）の8.36GFlops（同14.5%）を上回りました。他のサイズは、一番サイズが小さいオンキャッシュサイズより性能が低く、キャッシュの効果が見えています。A64FXは高SIMD幅計算を効率的に利用することで性能が高くなるため、ベクトル長がある程度長く、MHD変数含めて配列の1次元目がすべてキャッシュに載るサイズが

ベクトル計算とキャッシュヒットのバランスが良く、性能が高くなったと推測されます。図4では、明らかに性能が悪い計算サイズが1つありますが、これは計算サイズが $128 \times 128 \times 128$ の時であり、バンクコンフリクトが起きているため、性能が極端に劣化しています。

この計算サイズが異なる評価から、MHD コードでは、計算配列の1次元がある程度大きくベクトル計算が効率的に行え、1次元目とMHD変数がオンキャッシュの場合に性能が高くなるのがわかります。これは図3の配列並びにより性能が変化する理由となっており、xymz や xmyz という並びがこの条件を満たしていると考えられます。

最後にOpenMPを利用したハイブリッドMPI並列の性能を評価しました。1ノード48コアを利用し、8プロセス×6スレッドと4プロセス×12スレッド実行を、配列並びが異なる4つの場合に行いました。計算サイズはどの並列計算においても $300 \times 400 \times 400$ となっています。図5に評価結果を示しています。図4のFlat MPI実行時の48コア利用結果も比較のために加えています。

A64FXは1CMGに12コアの構成のため、1ノードあたり4プロセス×12スレッド実行が推奨されています。京コンピュータやFX10などでも同様の推奨であったが、実測ではFlat MPIの性能が高くなるのがこれまでの評価で分かっています[7]。それらの結果とは異なりA64FXでは、すべての配列並びにおいて、ハイブリッドMPIの性能がFlat MPIより高くなりました。図2の並列計算負荷結果から、プロセス数が48と大きいFlat MPI時の性能が低くなる原因が理解できます。一方で、12スレッドと6スレッドのどちらの性能が高くなるかは、配列並びによって異なる結果となりました。xyzmとmxyzでは、6スレッド(プロセス数が多い場合)で性能が高くなり(273GFlops、189GFlops)、xymzとxmyzでは、12スレッド(プロセス数が少ない場合)の性能が高くなりました(276GFlops、258GFlops)。xymzの結果は明らかな違いがあり、プロセス数の影響よりスレッド数が多くなる影響が大きいと考えられます。スレッド並列は、z次元に対して

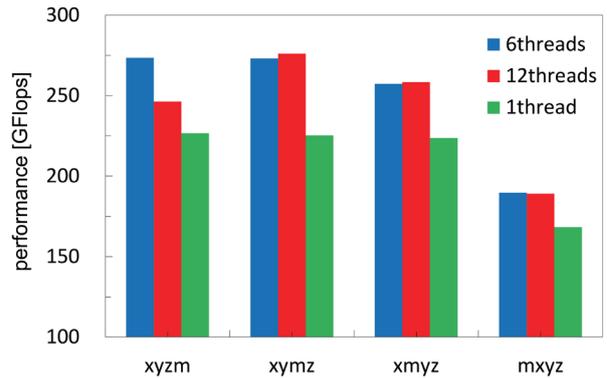


図5 異なる配列サイズにおけるMHDコードのハイブリッドMPI並列性能

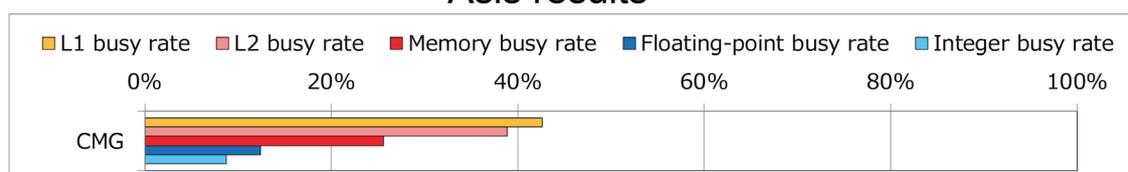
行っていますが、xyzmの場合には、mがzの外側にあるため、12スレッド並列時にキャッシュの利用などに影響がある可能性が考えられます。

5 A64FXに対する最適化

これまでの性能評価から、xymz配列並びを利用し、1ノードあたり4プロセス×12スレッド並列実行が最も性能が高い結果となりました(276GFlops、実行効率10%)。ここからは、いくつかの最適化をこの結果に対して行い、各最適化の性能向上への効果を調べてみます。FX700では、性能プロファイラとしてFX10などでも利用可能なCPU性能解析レポートが利用できます。詳細レポートを取得する場合は、17回実行する必要がありますが、各回で取得されたプロファイラ情報が1つのレポートとして出力されるため、最適化を行う際に役に立ちます。

まず初めに、詳細レポートから得られる図6のようなBusy rateを見ると、現在のMHDコードではL2とメモリが効率よく利用されていないことがわかります(Asis resultsのグラフ)。また、前述の通りA64FXでは、レジスタ数がFX10などだと比べ多くないために、ループを分割することが性能に効いてくると考えられます。そこで、キャッシュ・メモリ利用率向上に向けた最適化とループ分割をMHDコードに対して行っています。

Asis results



Optimization results

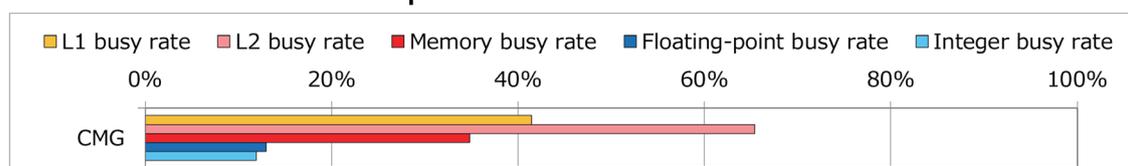


図6 最適化前と後における Busy rate

キャッシュの効果を見た図4では、配列サイズを各次元等しく設定していました（例えば $100 \times 100 \times 100$ ）。ここでは配列サイズを一定にし、各次元のサイズを変更することで、ベクトル計算性能とキャッシュ利用効率の向上を見込み、性能評価を行っています。表2にあるように5種類の配列サイズパターン（総配列サイズは一定）を利用しました。評価結果は表2にあるように約 239 GFlops~321GFlops と大きく変わりました。ベクトル計算のために、x 次元のサイズはある程度大きい必要があり、(200, 400, 300)と(100, 400, 600)では性能が出ていないと考えられます。また、図4の結果と同じようにxとy次元までキャッシュに載るようなサイズが、性能に効いてくるため、(600, 400, 100)は性能がそれほど高くなっていないと考えられます。うまくバランスが取れているのが、(300, 200, 400)と(600, 200, 200)と考えられ、性能が高くなっています。この結果、最大16%の性能向上となりました。

Fujitsu コンパイラにはループ分割を行うコンパイルオプションがいくつかあります。基本的には-Kloop_fission という自動ループ分割オプションをコンパイル時に付けることにより、コンパイラによるループ分割が行われます。この自動ループ分割により、性能が295GFlopsとなり、約7%の性能向上となっています。また、この自動ループ分割をどのように行うかを指定できる-Kloop_fission_threshold=n というオプションがあり、コードに指示文を挿入する必要がありますが、ハンドコーディングより容易に様々なループ

表2 各次元の計算サイズを変更した MHD コードの性能

Size (x, y, z)	Performance [GFlops]
200, 400, 300	239.2
100, 400, 600	243.9
300, 200, 400	311.1
600, 200, 200	321.1
600, 400, 100	302.4

分割を行うことができ、最適化が行えます。しかしながら、本性能評価で利用したコンパイラでは未対応だったのか（コンパイルエラーは出ないので、オプションは有効）、このオプションの効果が無く、評価はできていません。ループ分割をハンドコーディングで行うには手がかかり、コードのメンテナンスにも影響するため、今後も引き続き調査する予定です。

次に、ループ分割同様にレジスタ利用量を減らす効果を期待して、ループ内の計算に利用されるいくつかの変数をループ外で計算させ、その結果を配列に収納することで、ループ内の計算時に参照できるような最適化を行いました。図7にコードの例を示します。図中で赤字になっている箇所が変更部分です。MHD コードでは、MHD 変数の時間発展を差分で計算する際に、式(1)にあるように発散 (div)・回転 (rot)・勾配 (grad) を計算する必要があり、これらは差分式内で計算されていました。このため、ループ内の計算が多くな

り、A64FX ではレジスタ不足に陥る可能性が高くなります。また、実際の速度ベクトルの時間発展計算時には、重力を考慮した項が計算に含まれ、その項を計算する際に惑星からの距離が必要となります。この距離もループ内で計算していましたが、単純計算であり、レジスタ不足回避を狙い、ループ外で計算し、配列参照に変更しました。これらをコードに施した結果、336.7GFlops の性能を得ました。これは約 22% の性能向上となります。

最後に、キャッシュ利用効率を更に上げるために、プリフェッチを促進するコンパイルオプションを追加しました。プリフェッチに関するコンパイルオプションは効果の違いから多くのオプションが用意されています。その中で、`prefetch_infer`、`prefetch_line_L2=8`、`prefetch_stride` の 3 つを利用し、効果を確認しました。`prefetch_infer` の有無では性能に変化が現れず、追加の効果は得られませんでした。一方、`prefetch_line_L2=8` と `prefetch_stride` は性能向上が得られました。特に `prefetch_line_L2=8` は、8% 程度の性能向上があり、`prefetch_line_L2=8` と `prefetch_stride` の両方ともオプションとして付与すると、303.7 GFlops の性能 (約 10% の性能向上) を得ることができました。

基本的に MHD シミュレーションコードは流体コードであり、格子系流体差分計算のため、ここで得られた最適化の知見は、同様の流体計算にも広く効果があると考えられます。

これまでにそれぞれ効果があった最適化を、すべて行い 1CPU で実行すると、431.7 GFlops (実行効率 15.7%) と、元のコードと比べ 155 GFlops (実行効率で 5%) の性能向上となりました。図 6 にあるように最適化後は、L2 の利用率が 6 割を超え、メモリバンド幅も 35% の利用率に向上しています。しかしながら、基本的に MHD シミュレーションがメモリバンドの計算 (高 B/F 計算) であることを考えると、メモリバンドの利用率が足りていないように考えられます。FX700 の B/F 値が 0.37 であるため、まだ最適化の余地があるようです。CPU 性能解析レポートによると、Floating-point L2 cache miss や Floating-point operation wait、Floating-point mem wait の時間が多く見えています。これらを削減するために、更なる最適化が必要と思われます。

Asis code

```
f(i,j,2,k) = ff(i,j,2,k) + t * (
  ( p(i,j,10,k) * p(i,j,8,k)
  - p(i,j,11,k) * p(i,j,7,k)) / p(i,j,1,k)
  - gra * x / ra3)
  - dx2 * p(i,j,2,k) * (
    u(i,j,2,k) + u(i,j-1,2,k)
  + u(i,j,2,k-1) + u(i,j-1,2,k-1)
  - u(i-1,j,2,k) - u(i-1,j-1,2,k)
  - u(i-1,j,2,k-1) - u(i-1,j-1,2,k-1) )
  - dy2 * p(i,j,3,k) * (
    u(i,j,2,k) - u(i,j-1,2,k)
  + u(i,j,2,k-1) - u(i,j-1,2,k-1)
  + u(i-1,j,2,k) - u(i-1,j-1,2,k)
  + u(i-1,j,2,k-1) - u(i-1,j-1,2,k-1) )
  - dz2 * p(i,j,4,k) * (
    u(i,j,2,k) + u(i,j-1,2,k)
  - u(i,j,2,k-1) - u(i,j-1,2,k-1)
  + u(i-1,j,2,k) + u(i-1,j-1,2,k)
  - u(i-1,j,2,k-1) - u(i-1,j-1,2,k-1) )
  - dx2*(u(i,j,5,k) + u(i,j-1,5,k)
  + u(i,j,5,k-1) + u(i,j-1,5,k-1)
  - u(i-1,j,5,k) - u(i-1,j-1,5,k)
  - u(i-1,j,5,k-1) - u(i-1,j-1,5,k-1) )
  / p(i,j,1,k)
  + vmu * (
    dx4 * (ff(i+1,j,2,k)-2.0*ff(i,j,2,k)+ff(i-1,j,2,k))
  + dy4 * (ff(i,j+1,2,k)-2.0*ff(i,j,2,k)+ff(i,j-1,2,k))
  + dz4 * (ff(i,j,2,k+1)-2.0*ff(i,j,2,k)+ff(i,j,2,k-1))
  ) / ff(i,j,1,k)
```

Optimization code

```
f(i,j,2,k) = div2(i,j,2,k) + t * (
  ( p(i,j,10,k) * p(i,j,8,k)
  - p(i,j,11,k) * p(i,j,7,k)) / p(i,j,1,k)
  - gra * x(i) / ra3(i,j,k))
  - dx2 * p(i,j,2,k) * (
    u(i,j,2,k) + u(i,j-1,2,k)
  + u(i,j,2,k-1) + u(i,j-1,2,k-1)
  - u(i-1,j,2,k) - u(i-1,j-1,2,k)
  - u(i-1,j,2,k-1) - u(i-1,j-1,2,k-1) )
  - dy2 * p(i,j,3,k) * (
    u(i,j,2,k) - u(i,j-1,2,k)
  + u(i,j,2,k-1) - u(i,j-1,2,k-1)
  + u(i-1,j,2,k) - u(i-1,j-1,2,k)
  + u(i-1,j,2,k-1) - u(i-1,j-1,2,k-1) )
  - dz2 * p(i,j,4,k) * (
    u(i,j,2,k) + u(i,j-1,2,k)
  - u(i,j,2,k-1) - u(i,j-1,2,k-1)
  + u(i-1,j,2,k) + u(i-1,j-1,2,k)
  - u(i-1,j,2,k-1) - u(i-1,j-1,2,k-1) )
  - dx2*(u(i,j,5,k) + u(i,j-1,5,k)
  + u(i,j,5,k-1) + u(i,j-1,5,k-1)
  - u(i-1,j,5,k) - u(i-1,j-1,5,k)
  - u(i-1,j,5,k-1) - u(i-1,j-1,5,k-1) )
  / p(i,j,1,k)
```

図 7 ループ内変数計算部における最適化前後

表 3 様々な計算機システムにおける性能の傾向[2, 7, 8, 9]

	Core/CPU	Rmax [TFlops]	Rpeak [TFlops]	Rmax /CPU [GFlops]	Efficiency [%]	Suitable domain decomposition	CPU architecture
SX-ACE	1024/256	29.20	65.50	114.0	45	3D xyzm	Vector
K	262144/32768	914.12	4194.30	27.9	22	3D mxyz	SPARC64 VIIIfx
FX100	16384/512	91.49	576.72	178.7	17	3D xyzm	SPARC64 XIfx
CX400	23616/2952	104.23	510.11	35.3	20	3D xyzm	Xeon (SandyBridge)
HA8000	23160/1930	83.42	500.26	43.2	17	2D xyzm	Xeon (IvyBridge)
XC30	448/32	1.37	16.49	42.8	8	2D xyzm	Xeon (Haswell)
ITO-A	72000/4000	470.10	6912.00	117.5	7	1D xyzm	Xeon (Skylake)
XC40	1088/16	4.32	48.86	273.3	9	3D xyzm	Xeon Phi KNL
Tesla K20X	896/1	0.15	1.31	153.3	12	3D xyzm	Kepler
ITO-B	3584/1	0.38	5.30	382.2	7	3D_xyzm	Pascal
ThunderX2	256/8	0.70	4.50	86.9	16	3D mxyz	Arm v8
FX700	192/4	1.70	11,06	425.5	15	3D xymz	A64FX

6 他計算機システムとの比較

今回評価をした A64FX 搭載計算機 FX700 での MHD コードの性能を他の計算機システムでの MHD コードの性能と比較することで、A64FX の相対的な性能や各計算機の実性能を理解することに繋がります。表 3 にこれまで MHD コードの性能を計測したいくつかの計算機システムの結果と FX700 の測定結果を示しています[2, 7, 8, 9]。今回の性能評価では 3 次元領域分割において、4 種類の配列構造を利用しましたが、ITO-A と ThunderX2 の評価以外はいわゆる SoA (xyzm) と AoS (mxyz) を利用した測定しか行っていません。また、CPU (GPU、コプロセッサ) 自体の性能を比較しやすいように、CPU 当たりの性能 (Rmax/CPU) を表に加えています。

FX700 の結果は、最適化をすべて加え、4 ノードで実行した結果を記載しています。そのため、CPU 当たりの性能では、1 ノード (1CPU) 実行に比べ性能がわずかに下がっていますので、注意してください。

今回はシステム全体の性能ではなく、CPU 単体の性能比較に興味があるため、Rmax/CPU に注目します。A64FX は表中のどの CPU・GPU

よりも高い性能を示しており、Skylake Xeon の 3.6 倍、Xeon Phi KNL の 1.6 倍程度の性能となっています。Xeon は 2 ソケット/1 ノードを考えた場合、FX700 はノードあたり 1.8 倍の性能となっています。GPU では、Pascal Tesla と比べ、1.1 倍、Kepler Tesla の 2.8 倍の性能となりました。また、京コンピュータの SPARC64 VIIIfx と比べて、15 倍の性能向上となっています。

実行効率では、ベクトル機である SX-ACE が飛び抜けて高いですが、A64FX は ThunderX2 や FX100、IvyBridge Xeon と同程度となっています。これらの計算機は SIMD 幅が A64FX より低いことを考えると、A64FX は高い実行効率を示していると考えられます。前述のように、近年は同時演算回数の増加により理論性能を高くし、低い実行効率を示す CPU が多いですが、A64FX はそれらと比較して高い実行性能を持ち、実利用向けの CPU と考えられます。

7 まとめ

京都大学学術情報メディアセンターに試験的に導入された A64FX 搭載計算機 FX700 に対して、宇宙プラズマを解く MHD シミュレーションコードの性能測定を行いました。3 種類の領域分割を

行った結果、高次元領域分割の方がパック/アンパックや通信に係わる時間により、性能が低くなる傾向が見えました。異なる配列の並びによる MHD コードの A64FX での性能を評価では、キャッシュヒット率の高い AoS 形式の配列形状の性能が他の配列形状に比べ明らかに性能が低くなることが分かりました。その他はそれほど大きな差はありませんが、ベクトル計算を効率的に行うために x が最内に、キャッシュヒットのために m が z よりも内側になる配列形状が好ましい結果となりました。次に、キャッシュの効果を調べるために、配列サイズを小さくして、性能を評価したところ、配列形状と同じ理由で、大きすぎるサイズでは性能が劣化するが、すべてがオンキャッシュで無くともある程度の性能が出ることが分かりました。また、ハイブリッド MPI 並列実行におけるスレッド数の変化による性能変化を調べたところ、Flat MPI 実行よりもハイブリッド MPI 並列実行の方が高い性能を示しました。スレッド数による性能変化は配列形状に依存しますが、基本的には 12 スレッド×4 プロセス/CPU の実行が A64FX には適していました。

更に高い性能を目指し、いくつかの A64FX に対する最適化を MHD コードに施しました。配列の各次元におけるサイズの変更、自動ループ分割、ループ内変数のループ外での計算、プリフェッチの促進を行うと、1CPU で 155GFlops の性能向上が得られました。これにより、キャッシュの利用率やメモリバンド利用率の向上が見られましたが、MHD コードの B/F 値と FX700 の B/F 値を考えると、まだ最適化の余地があると思われます。

今回の評価結果を、これまでに性能評価した計算機システムと比較したところ、A64FX (1CPU) の性能は、Skylake Xeon の 3.6 倍、Xeon Phi KNL の 1.6 倍の性能となっていました。GPU と比べても、Pascal Tesla の 1.1 倍、Kepler Tesla の 2.8 倍の性能となりました。1.1 倍ではありますが、40 GFlops 以上の性能差となっています。実行効率で見ると、ThunderX2 や IvyBridge Xeon、FX100 と同程度であり、高 SIMD 幅 CPU としては高い実行効率を示しました。

今回は、ループ分割に対する追加の最適化を行えませんでした。重要な最適化であるため、今後の課題としています。

参考文献

- [1] 辻 美和子, Jean-christophe Weill, Jean-philippe Nomine, 佐藤 三久, ThunderX2 Arm プロセッサにおける Fiber ミニアプリスイートの性能評価、情報処理学会研究報告、2019-HPC-171(4)、1-8、2019.
- [2] 深沢圭一郎, 惑星磁気圏 MHD シミュレーションコードによる ThunderX2 ARM プロセッサの性能評価、情報処理学会研究報告、2019-HPC-172(1)、1-6、2019.
- [3] Ogino, T, R. J. Walker, M. Ashour-Abdalla, "A global magnetohydrodynamic simulation of the magnetopause when the interplanetary magnetic field is northward", IEEE Trans. Plasma Sci. vol. 20, 1992, 817-828.
- [4] Yoshida, T., Fujitsu High Performance CPU for the Post-K Computer, Hot Chips 30, 2018.
- [5] F. F. Chen, 1974. Introduction to Plasma Physics. Plenum Press, NY.
- [6] Fukazawa, K., T. Ogino, and R. J. Walker (2012), "A Magnetohydrodynamic Simulation Study of Kronian Field-Aligned Currents and Aurora", J. Geophys. Res., 117, A02214, doi:10.1029/2011JA016945.
- [7] Fukazawa, K., T. Nanri and T. Umeda, "Performance Measurements of MHD Simulation for Planetary Magnetosphere on Peta-Scale Computer FX10", Parallel Computing: Accelerating Computational Science and Engineering (CSE), Advances in Parallel Computing 25, pp.387-394, IOS Press, 2014.
- [8] Fukazawa, K., T. Soga, T. Umeda, T. Nanri, Performance Evaluation and Optimization of MagnetoHydroDynamic Simulation for Planetary Magnetosphere with Xeon Phi KNL, Parallel Computing is Everywhere: Accelerating Computational Science and Engineering (CSE), Advances in Parallel Computing, 178-187, DOI:10.3233/978-1-61499-843-3-178, 2018.
- [9] 深沢圭一郎, 南里豪志, 本田宏明, スーパーコンピュータシステム ITO における MHD シミュレーションコードの計算性能・消費電力評価、情報処理学会研究報告、2018-HPC-166(4)、1-6、2018.

JHPCN が拓くビッグデータサイエンス：高速データ伝送技術

村田健史 深沢圭一郎

京都大学学術情報メディアセンター

本報告は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 2018~2020 (課題名「HPC と高速通信技術の融合による大規模データの拠点間転送技術開発と実データを用いたシステム実証試験」) の成果に基づき、JGN および SINET を用いた広域分散クラウドシステムを紹介し、目指すべきビッグデータサイエンス環境の姿について議論する。特に、このような広域クラウドシステムで重要な役割を果たす高速データ伝送プロトコル (High-performance and Flexible Protocol: HpFP) について紹介する。

1 はじめに

筆者らは、近年のビッグデータサイエンスを加速することを目標に、文部科学省学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 計画 (課題名「HPC と高速通信技術の融合による大規模データの拠点間転送技術開発と実データを用いたシステム実証試験」) において、2018 年から 3 年にわたり情報基盤センター 5 拠点 (東北大、東京大、名古屋大、京都大、九州大) および 4 研究組織 (信州大、筑波大、千葉大、情報通信研究機構) を結ぶ全国規模の分散クラウドシステム (以下、JHPCN 広域分散クラウド) を構築してきた[1][2]。特に、2020 年度はこれらの 9 拠点を L2VPN 網で接続することで、高速で利便性の高い広域分散クラウド環境を実現している。各大学及び研究機関に広域分散する計算

機リソースを自由に組み合わせ、高速ネットワークを駆使した各ドメイン分野でのデータ駆動型研究およびアウトリーチを実施することを最終目標としている。

本稿では、JGN および SINET を用いた広域分散クラウドシステム (図 1) を紹介し、ビッグデータサイエンス環境について紹介する。とくに、広域分散クラウドで重要となる高速データ伝送技術について議論する。

2 高速データ伝送技術 (HpFP プロトコル)

2020 年には 300 億~500 億のモノがインターネットに接続する IoT 時代となり、莫大な数のセンサーやデバイスがネットワークに接続され、

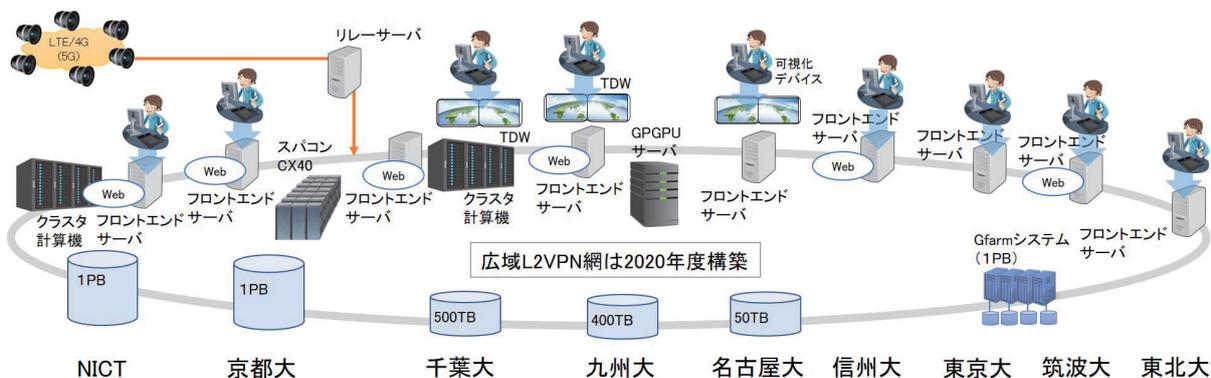


図 1. L2VPN 網を用いた学術研究における JHPCN 広域クラウドシステム：リソースは毎年変更になるため 2020 年度実績および 2021 年度申請をベースに本図を作成

Society5.0 を支える様々な分野のビッグデータが常時、蓄積・分析される。そこでは自然環境監視センサー（リモートセンシング）データ、遠隔ロボットや移動体・飛行体制御、少子高齢化社会を背景とした乳幼児見守り映像やヘルスケア情報伝送など、低遅延で安定に大量データ送信を必要とする高速データ伝送・遠隔制御技術が重要となる。センサーデータや画像データ等のビッグデータを処理するク計算機やデータストレージなどが脳や心臓、肺などの臓器であるとするれば、通信網はそれらを密に接続し情報を交換するための血管である。血流に滞りがあれば各臓器は機能せず、高性能な生命体は実現しない。したがって、そこではIoTシステムが高機能を発揮するための通信プロトコルが必要となる。

筆者らはNICTサイエンスクラウドプロジェクト[3]での経験を通じて、通信端末の高度化、ネットワーク広帯域化や仮想化のインフラ環境整備だけでは真のビッグデータサイエンスが実現しないことを実体験してきた。アプリケーションが広帯域環境を十分に活用できる通信プロトコル（通信ライブラリ）が存在しないからである。現在のIoT通信ではHTTPSやMQTT（Message Queuing Telemetry Transport）などが想定されているが、これらのプロトコルはIoTが求める多様で複雑なニーズに応えるには限界がある。現在のビッグデータ通信においてはアプリケーション層とネットワーク層の間で重要な役割を果たすプロトコル層のデータ通信技術が抜け落ちており、この層が通信ボトルネックとなる可能性が高い。

ほとんどのビッグデータサイエンティストが体験しているように、多くの通信環境においてアプリ

ケーションはワイヤレートを達成できない。たとえばバンド幅 100Mbps のネットワークにおいて現実のアプリケーションが 1Mbps 程度の通信速度しか達成できない事例を、我々は頻繁に体験している。その理由の一つは、HTTPS や MQTT のベースとなる TCP プロトコルが遅延やパケットロスおよびジッタ（遅延やパケットロス率の変動によるデータパケット到達時間の揺らぎ）を伴う現実的なネットワーク環境では高いスループットを達成できないからである。例えば図 2-1 は LTE、WiMAX、4G、WiFi 等の既存 IP モバイル網を想定した高遅延ネットワーク上での TCP の振る舞いである。TCP プロトコルはパケットロスがない環境であれば 500 ミリ秒の遅延があっても 9Gbps 以上の高速通信を実現できる。しかし、わずかなパケットロスによりその通信速度は極端に低下する。図 2-1 では、0.01% のパケットロスが発生しただけで TCP の通信速度が 10 倍以上落ち込んでいることが分かる。Google によるとインターネットで通信プロトコルを考える場合、一般には 1~2% 程度のパケットロスを想定する必要がある。屋外での WiFi や LTE/4G や衛星通信などの無線通信ではさらに大きなパケットロスが発生することが多い。

そこで筆者らは、2014 年から長距離高遅延環境でパケットロスがあっても高い通信性能を有する独自の通信プロトコル HpFP (High-performance and Flexible Protocol) と HpFP を用いた高速データ伝送アプリケーション開発を進めている[4][5]。HpFP は UDP をベースとして開発した高信頼通信プロトコルであり、性能劣化が激しい長距離高遅延通信（最大 4 秒程度）、パケットロス（最大 15% 程度）、

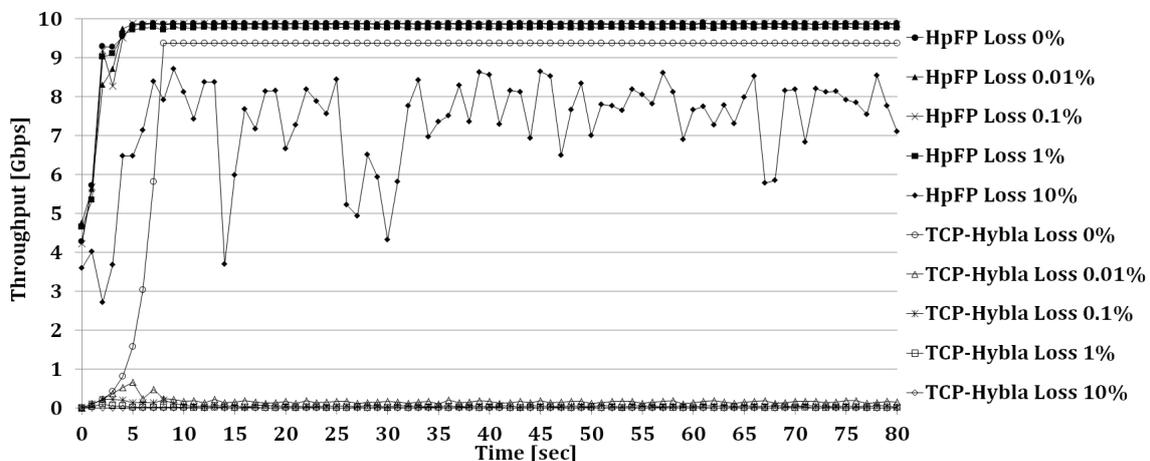


図 2-1. 室内実験による TCP と HpFP の通信性能評価

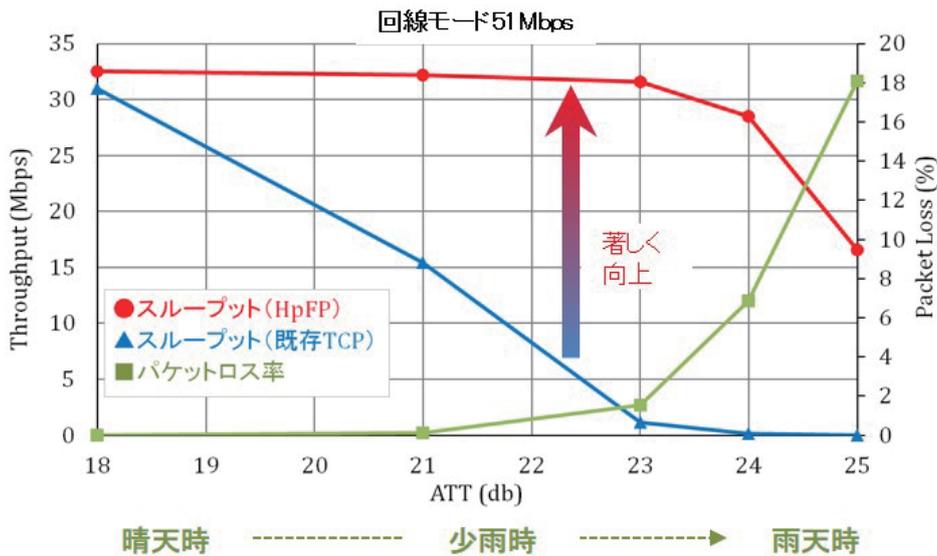


図 2-2. WINDS 衛星通信環境における高速データ伝送性能評価：ビットエラー（IP パケットロス）が発生しやすい降雨時に特に効果がある

帯域変動、ジッタなどの現実的な（すなわちテストベッドのように「きれい」ではない WiFi やインターネット等の）ネットワークにおいて、TCP と比較して低遅延通信が実現できることを室内実験で検証した（図 2-1）。この成果をもとに多くの実ネットワークで HpFP の性能検証を行った。例えば降雨時のビットエラー（IP 通信からみるとパケットロス）が不可避である衛星通信[6]では特に有効な性能を検証済みである（図 2-2）。

HpFP の利点の一つはソケットライブラリが TCP 互換であり過去の TCP プログラムを HpFP で置き換えることができることである。Linux、Windows などの汎用 OS だけではなく、Raspberry Pi など IoT に適したシングルボードコンピュータ（ARM プロセッサ）でも動作する。筆者らはクレアリンクテクノロジー社との協力で HpFP をベ-

スとしたファイル転送アプリケーション（HCP）を開発した。このアプリケーションは rsync に似たインターフェースを有しており、Linux ベースのサーバ、および Linux、Windows および Raspberry Pi ベースのクライアントから構成される。HCP では 10Gbps の高速通信環境においても既存の TCP プロトコルとの間の公平性・親和性が達成されている。図 2-3 は室内実験、図 2-4 は JHPCN 通信網実験での HCP アプリケーションによる公平性の検証結果である。ネットワーク輻輳時には公平性（限られた帯域を既存の TCP と均等に分け合う）を担保しつつ、親和性（既存の TCP 通信が使わない帯域が十分に空いているときには既存通信に影響を与えずに残り帯域を使い切る）を実現できていることが分かる。

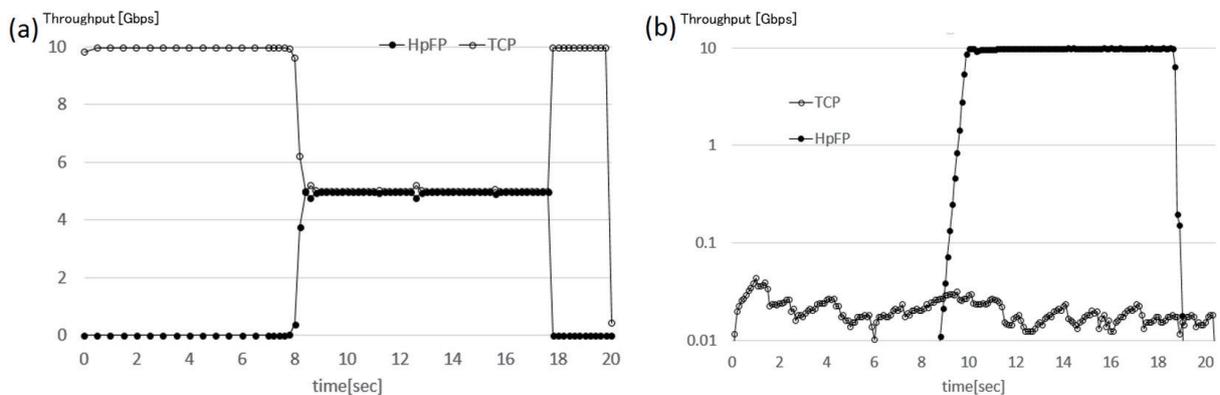


図 2-3. 室内実験による HpFP の Fairnet（公平性）検証

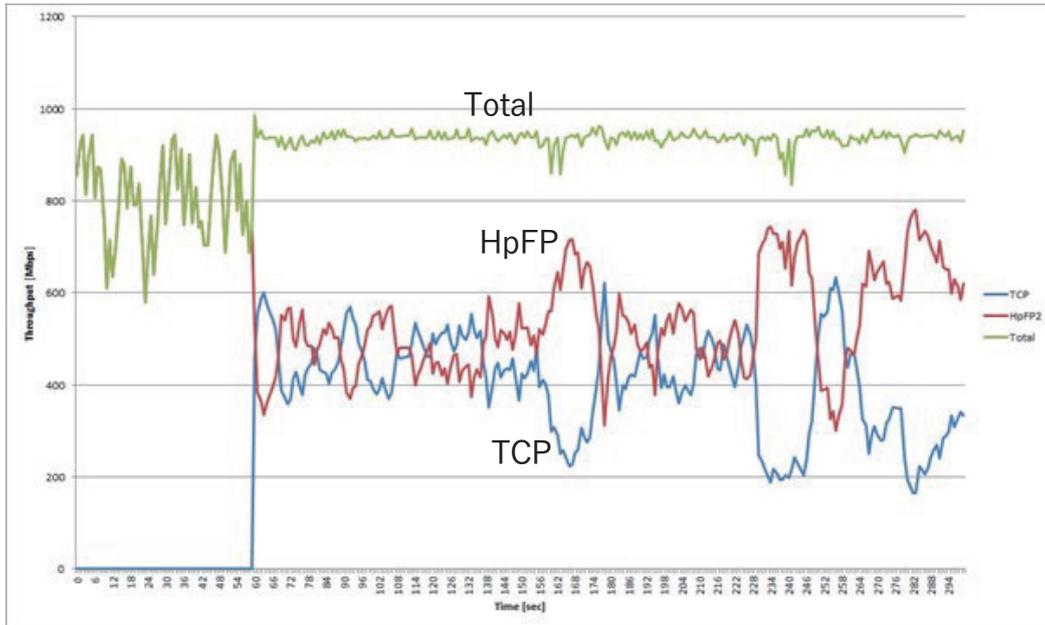


図2-4. JHPCN 実環境 (L3) による HpFP の Fairness (公平性) 検証

3 高速データ伝送技術を活用した広域分散クラウド

各拠点大学・参加大学を接続する JHPCN 広域分散クラウドの L2VPN 網は 2020 年度中に完了予定であるが、準備が整った拠点から順に TCP (iperf3 により計測) と HpFP (hperf により計測) による基礎通信性能評価を進めている。L2VPN 環境では

L3 環境よりも高速な通信を実現(多くの場合はバンド幅近く通信速度を達成) できており、JGN と SINET を組み合わせた L2VPN 網の有効性が確認された(図3-1)。また、各 Web サーバ(図1)からのローカルおよびリモートディスクアクセス速度を dd コマンドで評価したが、どの場合にも十分な実用性を確認した(表3-1)。NICT、千葉大学および京都大学間で HCP によるファイルコピーを行っ

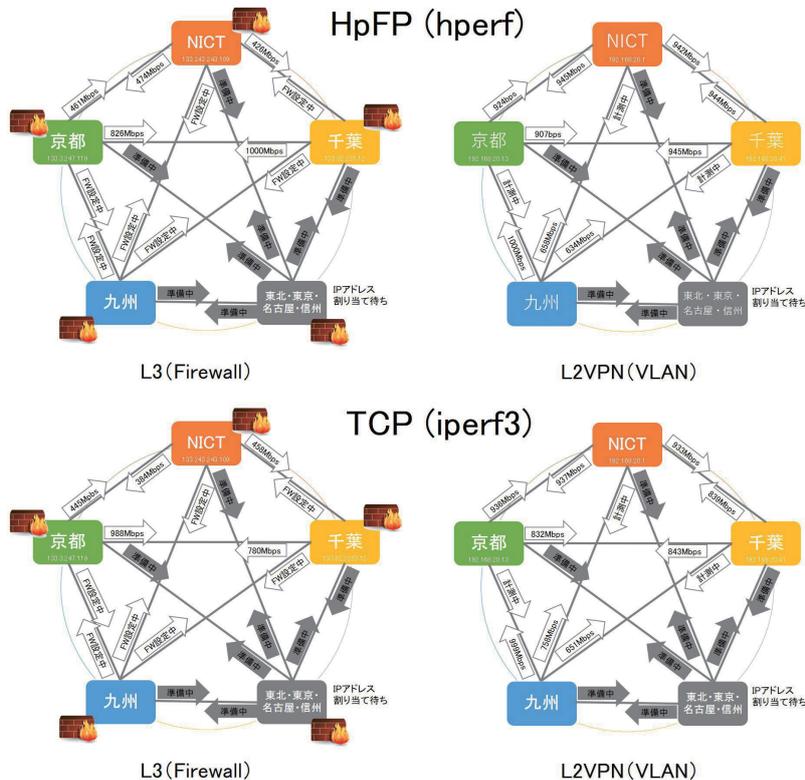


図3-1. HpFP (hperf) およびTCP (iperf3) による基礎通信計測結果：上限 1Gbps で計測

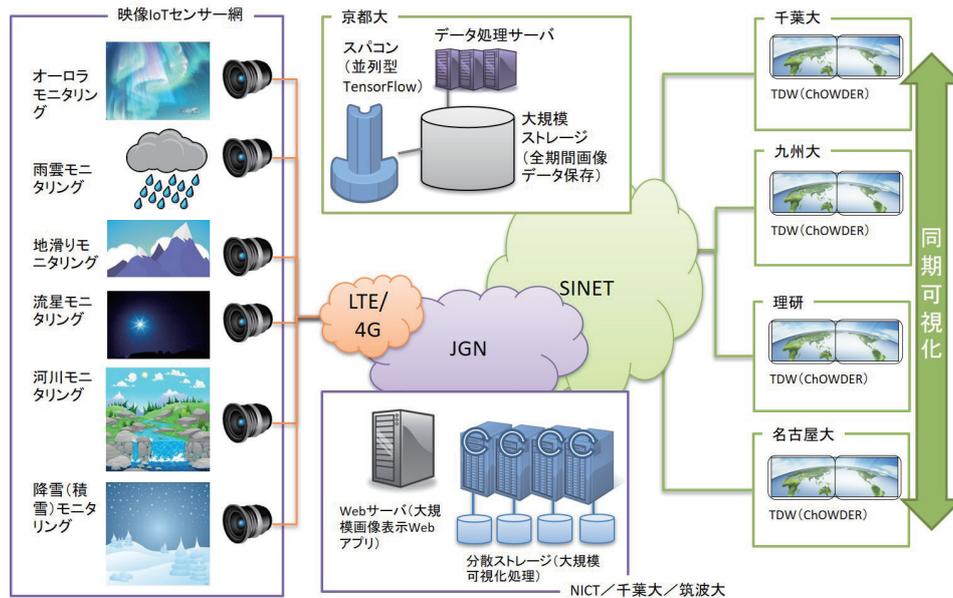


図 3-2. JHPCN 広域分散クラウド活用事例：映像 IoT と TDW による画像データ処理と分散同期可視化

た結果 (表 3-2) から HCP ツールは JHPCN 広域分散クラウド内において十分に実用的であることが分かっている。

表 3-1. ローカル・リモートストレージ I/O 速度 (L2VPN 網)：上限 1 Gbps で dd コマンド計測

ストレージ	@NICT	@千葉大	@京都大
NICT サーバ	1331MB/s	87MB/s	62MB/s
千葉大サーバ	96MB/s	764MB/s	27MB/s
京都大サーバ	79MB/s	79MB/s	96MB/s

表 3-2. HCP ツールによるファイル読み出し速度 (L2VPN 網)

ストレージ	@NICT	@千葉大	@京都大
NICT サーバ	86MB/s	108MB/s	45MB/s
千葉大サーバ	62MB/s	112MB/s	107MB/s
京都大サーバ	87MB/s	98MB/s	88MB/s

これらの結果から、学術研究分野において図 1 の広域分散クラウドは実用段階に入ったと判断している。今後はビッグデータサイエンスの実証として大規模データ・大容量ネットワーク活用事例を積み重ねていく。たとえば図 3-2 は JHPCN 広域分散クラウド活用事例の一つであり、各拠点のリソースを組みあわせて映像 IoT[7]と TDW による画像データ処理・可視化を実現する。TDW 表示画像の遠隔同期には理化学研究所が中心となり開発を進めている ChOWDER を用いる[8]。

なお、HpFP プロトコルによるファイル転送ツール HCP は SC Asia2020 の Data Mover Contest

(DMC20) において図 3-3 の国際高速ネットワーク (100G 回線) で実測 40Gbps 以上をファイル転送で達成しており[9]、図 3-4 に示すように HCP (HpFP) は Experimental Excellence Award を受賞した。これにより、JHPCN 広域分散クラウドの拠点間で十分な高速性能を発揮できることを検証済みである。

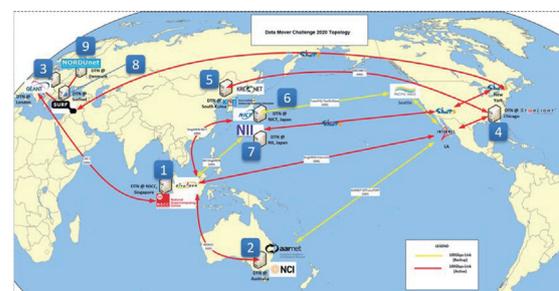


図 3-3. DMC20 実験網：世界全域を 100G 網で L2 接続：HCP ツールによりノード (DTN) 間での実データファイル伝送速度を競う



図 3-4. HCP(HpFP)は「Experimental Excellence Award」を受賞



図4 JHPCN 広域分散クラウド活用イメージ：ビッグデータ気象・防災情報可視化システム

4 おわりに

総合科学技術会議第5期基本計画の4本柱は、持続的な成長と地域社会の自律的発展、国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現、地球規模課題への対応と世界の発展への貢献、知の資産の持続的創出である。ビッグデータサイエンスはこれら4本すべてに寄与できるポテンシャルを有している。そのためには、実用レベルの広域分散クラウド環境は重要であり、我々はそれが有効であることを具体的な事例を通じて示していくことをモチベーションとしている。たとえば図4はJHPCN広域分散クラウド活用事例の一つとして、筆者らが提案するビッグデータ気象・防災可視化システムのイメージである。安価な映像IoTセンサーを広域に多数設置し、地域全体を地点高密度に“見守る”ネットワークシステムを構築することで、高速データ伝送技術により映像をクラウド内にリアルタイム伝送する。図3-2のシステム上でリアルタイムに大量データが流れ込むことで、映像を超高解像度で可視化することでリアルタイムに災害状況を協調的に解析することができる。

5 謝辞

本研究成果は、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点、および革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの支援による（課題番号：jh200038-MDH）成果です。また、JST SICORP

JPMJSC18E3、JST CREST JPMJCR15K4、JST COI JPMJCE1307、JSPS 科研費 JP19HP8020、JSPS 科研費 JP17K00158、JSPS 科研費 15K06129、ROIS-DS-JOINT (008RP2020)、京大大学生存圏研究所の生存圏ミッション研究の成果の一部を紹介しています。本研究にご協力いただいたクリアリンクテクノロジー社、千葉大学・樋口篤志先生および理化学研究所・川鍋友宏さんに感謝します。

6 参考文献

- [1] P. Pavarangkoon, K. T. Murata, K. Yamamoto, K. Muranaga, T. Mizuhara, K. Fukazawa, R. Egawa, T. Katagiri, M. Ogino and T. Nanri, "Performance Improvement of High-Speed File Transfer over JHPCN," 2019 IEEE Intl Conf on DASC, Intl Conf on PiCom, Intl Conf on CBDCOM, Intl Conf on CyberSciTech, Fukuoka, Japan, 2019, pp. 1086-1089. doi:
- [2] K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Yamamoto, K. Muranaga, T. Mizuhara, K. Fukazawa, R. Egawa, T. Katagiri, M. Ogino and T. Nanri, "High-Speed File Transfer of Real Datasets over JHPCN," IEICE Technical Report, Vol. 118, No. 466, pp. 175-179, Okinawa, Japan, 4-5 Mar. 2019.
- [3] 矢木大介, 村田健史, 笠原禎也, "科学衛星で観測された波形データ処理を用いた NICT サイ

- エンクラウド上での並列分散処理の評価," 情報知識学会誌, vol. 25, no. 1, pp. 3-22, 2015, doi: 10.2964/jsik_2015_002.
- [4] K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Yamamoto, Y. Nagaya, T. Mizuhara, A. Takaki, K. Muranaga, E. Kimura, T. Ikeda, K. Ikeda and J. Tanaka, "A quality measurement tool for high-speed data transfer in long fat networks," 2016 24th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772111
- [5] K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Inoue, T. Mizuhara, Y. Kagebayashi, K. Yamamoto et al., "Development of High-Performance and Flexible Protocol Handler for International Web Accesses," 2019 IEEE 21st Intl Conf on HPCC, IEEE 17th Intl Conf on Smart City; IEEE 5th Intl Conf on DSS, Zhangjiajie, China, 2019, pp. 1958-1963. doi: 10.1109/HPCC/SmartCity/DSS.2019.00270
- [6] 村田健史, 山本和憲, パワランクン プラパン, 鈴木健治, 浅井敏男, 菅智茂, 村永和哉, 水原隆道, 影林佑哉, 柿澤康範, 矢羽田将友, "HpFP プロトコルによる WINDS 衛星の回線品質検査," 情報通信研究機構研究報告, vol. 63, no. 2, pp. 153-162, 2017, doi: 10.24812/nictkenkyuhokoku.63.2_153.
- [7] K. T. Murata, P. Pavarangkoon, S. Phon-Amnuaisuk, T. Mizuhara, K. Yamamoto, K. Muranaga and T. Aoki, "A Programming Environment for Visual IoT on Raspberry Pi," The 5th IEEE International Conference on Cloud and Big Data Computing (CBDCom 2019), Fukuoka, Japan, 5-8 Aug. 2019.
- [8] T. Kawanabe, K. Hatta, and K. Ono, "ChOWDER: A New Approach for Viewing 3D Web GIS on Ultra-High-Resolution Scalable Display." In Proceedings of The 2020 IEEE International Conference on Cluster Computing pp. 412-413. Sep. 2020. doi:10.1109/CLUSTER49012.2020.00055
- [9] P. Pavarangkoon, K. T. Murata, K. Yamamoto, N. Fujita, H. Ohkawa, H. Mikai, Y. Ikehata, K. Muranaga, T. Mizuhara, A. Takaki and Y. Kakizawa, "Performance Evaluation of High-Performance and Flexible Protocol on Data Mover Challenge," in The 5th International Conference on Information Technology (InCIT2020), ChonBuri, Thailand, Oct. 21-22, 2020.

システム A 運転状況 (2020 年 4 月 ~ 2020 年 9 月)

1) 保守作業に伴うサービス休止およびシステムダウン障害発生状況

保守作業に伴うサービス休止

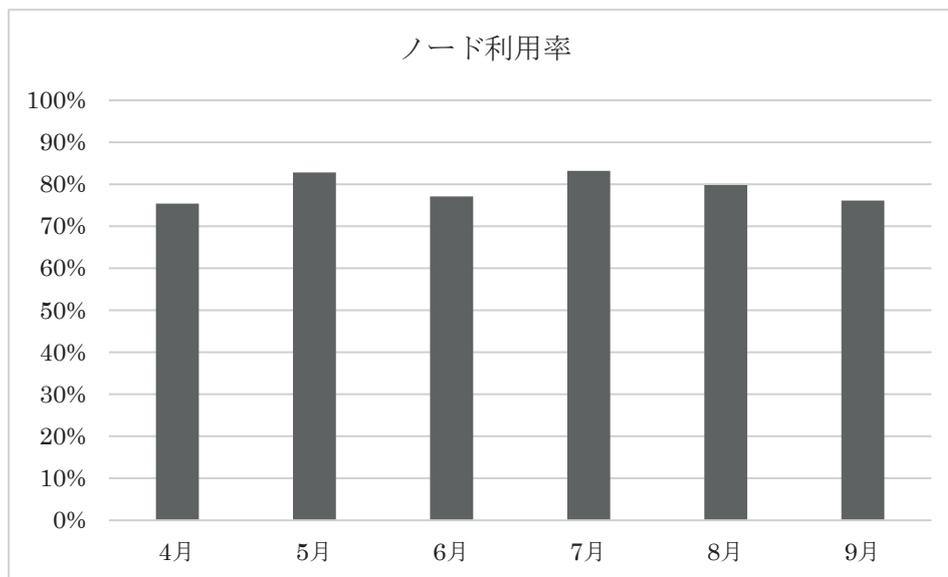
保守開始日時	サービス再開日時	保守時間[h]
2020/04/01 0:00	2020/04/03 10:00	58.00
2020/06/02 9:00	2020/06/02 15:00	6.00
2020/09/13 6:00	2020/09/16 15:30	81.50

システムダウン障害発生状況

障害発生日時	サービス再開日時	ダウン時間[h]
2020/04/04 17:27	2020/04/04 18:38	1.18
2020/09/17 11:20	2020/09/17 18:00	6.67

2) サービス状況

	サービス 時間[h]	ジョブ					
		処理 件数	経過 時間[h]	占有 時間[h]	CPU 時間[h]	平均稼動 ノード数	ノード 利用率
4 月	660.8	49,566	302,741	54,327,988	34,947,518	1,799.2	75.4 %
5 月	744.0	96,493	374,687	79,549,040	64,149,238	1,797.2	82.8 %
6 月	714.0	85,520	187,691	65,879,199	50,333,743	1,796.3	77.1 %
7 月	744.0	71,872	254,673	76,771,000	61,554,716	1,798.1	83.2 %
8 月	744.0	54,938	192,013	73,057,419	58,128,519	1,796.0	79.8 %
9 月	631.8	33,685	169,473	62,563,465	52,413,331	1,708.1	76.1 %
計/平均	4238.6	392,074	1,481,278	412,148,111	321,527,065	1,782.5	79.1 %



- 占有時間 = 合計(経過時間×占有コア数)
- 平均稼動ノード数 = 電源 ON 状態のノード数の月平均 (10 分間隔のサンプリングデータより算出)
- ノード利用率 = 稼動ノードに対するジョブが実行されているノードの割合

システム B 運転状況 (2020 年 4 月 ~ 2020 年 9 月)

1) 保守作業に伴うサービス休止およびシステムダウン障害発生状況

保守作業に伴うサービス休止

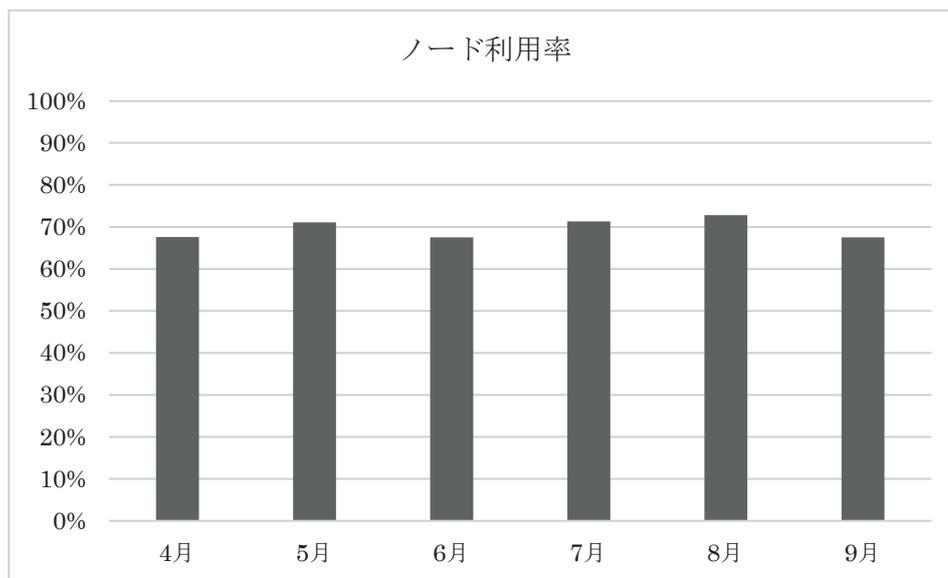
保守開始日時	サービス再開日時	保守時間[h]
2020/04/01 0:00	2020/04/03 10:00	58.00
2020/06/02 9:00	2020/06/02 15:00	6.00
2020/09/13 6:00	2020/09/16 15:30	81.50

システムダウン障害発生状況

障害発生日時	サービス再開日時	ダウン時間[h]
2020/07/29 15:37	2020/07/29 17:31	1.90
2020/08/07 12:00	2020/08/07 12:31	0.52
2020/08/09 7:13	2020/08/09 20:30	13.28
2020/09/16 15:30	2020/09/16 18:20	2.83
2020/09/17 11:20	2020/09/17 18:00	6.67

2) サービス状況

	サービス 時間[h]	ジョブ					
		処理 件数	経過 時間[h]	占有 時間[h]	CPU 時間[h]	平均稼動 ノード数	ノード 利用率
4 月	662.0	105,732	450,424	15,662,759	11,778,260	793.4	67.6 %
5 月	744.0	87,853	541,594	14,646,880	11,789,871	814.0	71.1 %
6 月	714.0	84,656	485,529	13,819,598	11,906,428	812.7	67.5 %
7 月	742.1	155,607	555,470	14,449,554	11,790,054	812.5	71.3 %
8 月	730.2	251,418	655,084	14,630,368	11,705,773	813.8	72.8 %
9 月	629.0	106,598	482,976	12,122,259	10,367,146	762.8	67.5 %
計/平均	4,221.3	791,864	3,171,077	85,331,418	69,337,532	801.5	69.6 %



- 占有時間 = 合計(経過時間×占有コア数)
- 平均稼動ノード数 = 電源 ON 状態のノード数の月平均 (10 分間隔のサンプリングデータより算出)
- ノード利用率 = 稼動ノードに対するジョブが実行されているノードの割合

システムC 運転状況 (2020年4月～2020年9月)

1) 保守作業に伴うサービス休止およびシステムダウン障害発生状況

保守作業に伴うサービス休止

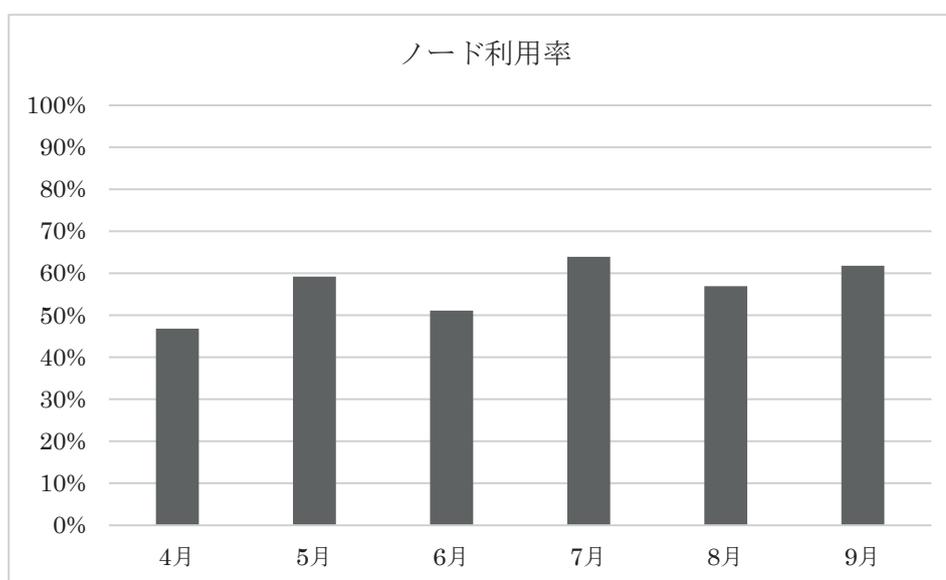
保守開始日時	サービス再開日時	保守時間[h]
2020/04/01 0:00	2020/04/03 10:00	58.00
2020/06/02 9:00	2020/06/02 15:00	6.00
2020/09/13 6:00	2020/09/16 15:30	81.50

システムダウン障害発生状況

障害発生日時	サービス再開日時	ダウン時間[h]
2020/07/29 15:37	2020/07/29 17:31	1.90
2020/09/17 11:20	2020/09/17 18:00	6.67

2) サービス状況

	サービス時間[h]	ジョブ					ノード利用率
		処理件数	経過時間[h]	占有時間[h]	CPU時間[h]	平均稼動ノード数	
4月	662.0	2,604	22,760	395,952	227,918	15.5	46.8 %
5月	744.0	1,503	16,584	325,912	146,543	16.0	59.2 %
6月	714.0	1,927	21,438	308,190	155,377	16.0	51.1 %
7月	742.1	2,799	55,039	377,151	170,261	16.0	63.9 %
8月	744.0	1,872	15,858	290,607	151,078	16.0	56.9 %
9月	631.8	1,509	15,297	260,492	102,795	15.4	61.8 %
計/平均	4,237.9	12,214	146,976	1,958,304	953,972	15.8	56.6 %



- 占有時間 = 合計(経過時間×占有コア数)
- 平均稼動ノード数 = 電源 ON 状態のノード数の月平均 (10 分間隔のサンプリングデータより算出)
- ノード利用率 = 稼動ノードに対するジョブが実行されているノードの割合

センター利用による研究成果

—2019年度計算機利用結果報告書から—

【1001 情報学基礎】

1. Junya Nakamura, Yonghwan Kim, Yoshiaki Katayama, and Toshimitsu Masuzawa : A cooperative partial snapshot algorithm for checkpoint - rollback recovery of large - scale and dynamic distributed systems and experimental evaluations : *Concurrency and Computation Practice and Experience*, Vol.5647, 2020

【1501 生活科学一般】

2. Y. Takeda, T. Matsuno, A. K. Sharma, W. M. C. Sameera, S. Minakata : Asymmetric synthesis of b-aryl amino acids through Pd-catalyzed enantiospecific and regioselective ring-opening Suzuki-Miyaura arylation of aziridine-2-carboxylates : *Chem. Eur. J.*, Vol.25, pp.102261 - 102231, 2019

【2201 社会システム工学・安全システム】

3. 佐藤建, 小林健一, 藤本泰文 : 伊豆沼の冬季環境モニタリングのためのタイムラプス画像解析 : 伊豆沼・内沼研究集会発表要旨集, Vol.14, pp.5 - 6, 2020
4. 大関克弥, 佐藤建, 金沢靖, 小林健一 : UAV と簡易マルチスペクトルカメラによる伊豆沼の水生植物分布の可視化に関する研究 : 伊豆沼・内沼研究集会発表要旨集, Vol.14, pp.3 - 4, 2020
5. Tatsuru Sato, Ken-ichi Kobayashi, Katsuya Oseki : IoT measurements of the winter environment around Lake Izunuma, Miyagi : *The Tenth Symposium on Polar Science*, pp.OMp27 -, 2019
6. 大関克弥, 佐藤建, 金沢靖, 小林健一 : UAV と農業用マルチスペクトルカメラによる伊豆沼の植生分類に関する研究 : *Optics & Photonics Japan 2019*, pp.3pE14 -, 2019

【2202 自然災害科学】

7. Asano, K. and T. Iwata : Source rupture process of the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake deduced from strong-motion data considering seismic wave propagation in three-dimensional velocity structure : *Earth, Planets and Space*, Vol.71, No.101, pp.1-17, 2019
8. 関口春子・浅野公之・岩田知孝 : 奈良盆地の3次元速度構造モデルの構築と検証 : *地質学雑誌*, Vol.125, No.10, pp.715 - 730, 2019

【4304 数理物理・物性基礎】

9. Mitsuru Tanaka : Motion of spherical bubbles in homogeneous shear turbulence : *Fluid Dynamics Research*, Vol.51, No.3, pp.035505-1 - 035505-25, 2019
10. Mitsuru Tanaka , Kyohei Tajiri , Hidetoshi Nishida , Masashi Yamakawa : Effect of Eccentric Mass Distribution on the Motion of Spherical Particles in Shear Flows : *Journal of Fluids Engineering*, Vol.142, No.3, pp.031105-1 - 031105-12, 2020
11. Taro Fukazawa, Hisazumi Akai, Yosuke Harashima, Takashi Miyake : First-principles study of intersite magnetic couplings in NdFe12 and NdFe12X (X=B, C, N, O, F) : *Journal of Applied Physics*, Vol.122, pp.053901-1 - 053901-9, 2017
12. Yosuke Harashima, Taro Fukazawa, Hiori Kino, and Takashi Miyake : Effect of R-site substitution and the pressure on stability of RFe12: A first-principles study : *Journal of Applied Physics*, Vol.124, pp.163902-1 - 163902-6, 2018
13. Taro Fukazawa, Hisazumi Akai, Yosuke Harashima, and Takashi Miyake : First-

- principles Study of Intersite Magnetic Couplings and Curie Temperature in $RFe_{12}Cr_x$ ($R = Y, Nd, Sm$) : J. Phys. Soc. Jpn., Vol.87, pp.044706-1 - 044706-5, 2018
14. Yuta Toga, Masamichi Nishino, Seiji Miyashita, Takashi Miyake, and Akimasa Sakuma : Anisotropy of exchange stiffness based on atomic-scale magnetic properties in the rare-earth permanent magnet $Nd_2Fe_{14}B$: Physical Review B, Vol.98, pp.054418-1 - 054418-10, 2018
 15. Yasutomi Tatetsu, Yosuke Harashima, Takashi Miyake, and Yoshihiro Gohda : Role of typical elements in $Nd_2Fe_{14}X$ ($X = B, C, N, O, F$) : Physical Review Materials, Vol.2, pp.074410-1 - 074410-9, 2018
 16. Taro Fukazawa, Hisazumi Akai, Yosuke Harashima, and Takashi Miyake : Curie Temperature of Sm_2Fe_{17} and $Nd_2Fe_{14}B$: A First-Principles Study : IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.55, No.7, pp.2101305-1 - 2101305-5, 2019
 17. Taro Fukazawa, Hisazumi Akai, Yosuke Harashima, Takashi Miyake : First-principles study of spin-wave dispersion in $Sm(Fe_{1-x}Co_x)_{12}$: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.469, pp.296 - 301, 2018
 18. Taro Fukazawa, Yosuke Harashima, Zhufeng Hou, and Takashi Miyake : Bayesian optimization of chemical composition: A comprehensive framework and its application to RFe_{12} -type magnet compounds : PHYSICAL REVIEW MATERIALS, Vol.3, pp.053807-1 - 053807-15, 2019
- 【4306 生物物理・化学物理】
19. Hirotaka Kitoh-Nishioka, Koji Ando : Calculation of Charge-Transfer Electronic Coupling with Nonempirically Tuned Range-Separated Density Functional : The Journal of Physical Chemistry C, Vol.123, No.18, pp.11351 - 11361, 2019
 20. Hirotaka Kitoh-Nishioka, Yasuteru Shigeta, Shigeru Itoh, Akihiro Kimura : Excitonic Coupling on a Heliobacterial Symmetrical Type-I Reaction Center: Comparison with Photosystem I : The Journal of Physical Chemistry B, Vol.124, No.2, pp.389 - 403, 2020
 21. Shimpei Nishida, Shun Sakuraba, Kiyoshi Asai, Michiaki Hamada : Estimating energy parameters for RNA secondary structure predictions using both experimental and computational data : IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics, Vol.16, No.5, pp.1645 - 1655, 2018
 22. A Hirano, T Kameda, S Sakuraba, M Wada, T Tanaka, H Kataura : Disulfide bond formation of thiols by using carbon nanotubes : Nanoscale, Vol.9, No.17, pp.5389 - 5393, 2017
 23. Hong Wang, Mohanad H Nada, Yoshimasa Tanaka, Shun Sakuraba, Craig T Morita : Critical Roles for Coiled-Coil Dimers of Butyrophilin 3A1 in the Sensing of Prenyl Pyrophosphates by Human $V\gamma 2V\delta 2$ T Cells : The Journal of Immunology, Vol.203, No.3, pp.607 - 626, 2019
 24. Hideaki Takahashi, Daiki Suzuoka, Shun Sakuraba, Akihiro Morita : Role of the Photosystem II as an Environment in the Oxidation Free Energy of the Mn Cluster from S1 to S2 : The Journal of Physical Chemistry B, Vol.123, No.33, pp.7081 - 7091, 2019
 25. Hideaki Takahashi, Shun Sakuraba, Akihiro Morita : Large-Scale Parallel Implementation of Hartree-Fock Exchange Energy on Real-Space Grids Using 3D-Parallel Fast Fourier Transform : Journal of chemical information and modeling, Vol.60, No.3, pp.1376 -, 2020
- 【4601 物理化学】
26. Tatsuya Joutsuka, Satoshi Yamauchi : Low-pressure chemical vapor deposition of Cu on Ru substrate using CuI : Ab initio calculations : Chemical Physics Letters, Vol.741, pp.137108, 2020
 27. Tatsuya Joutsuka and Satoshi Yamauchi : Low-pressure chemical vapor deposition of Cu on Ru substrate using CuI : Ab initio calculations : Chem. Phys. Lett., Vol.741,

pp.137108 -, 2020

【4602 有機化学】

28. Hiroki Takahashi, Yuki Numao, Junko Motokawa, Simon Clevers, Gerard Coquerel, Hirohito Tsue, and Rui Tamura : A Novel Mechanism of Preferential Enrichment Phenomenon Observed for the Cocrystal of (RS)-2-{4-[(4-Chlorophenoxy)methyl]phenoxy}propionic Acid and Isonicotinamide : Chemistry A European journal, Vol.25, pp.16405 - 16413, 2019

【4702 合成化学】

29. Iwamoto, H.; Hayashi, Y.; Ozawa, Y.; Ito, H. : Silyl-group-directed Linear-selective Allylation of Carbonyl Compounds with Trisubstituted Allylboronates Using a Copper(I) Catalyst : ACS Catalysis, Vol.10, pp.2471 - 2476, 2020

【4801 機能材料・デバイス】

30. Yoshiyuki Miyamoto, Tokutaro Komatsu : Molecular-scale modeling of light emission by combustion: An ab initio study : Scientific Reports, Vol.9, pp.12707 -, 2019
31. Ken-ichi Otake, Kazuya Otsubo, Tokutaro Komatsu, Shun Dekura, Jared M. Taylor, Ryuichi Ikeda, Kuniyoshi Sugimoto, Akihiko Fujiwara, Chien-Pin Chou, Aditya Wibawa Sakti, Yoshifumi Nishimura, Hiromi Nakai & Hiroshi Kitagawa : Confined water-mediated high proton conduction in hydrophobic channel of a synthetic nanotube : Nature Communications, Vol.11, pp.843-, 2020
32. Tomohiro Higashino, Hitomi Iiyama, Yuma Kurumisawa, Hiroshi Imahori : Thiazolocatechol: Electron - Withdrawing Catechol Anchoring Group for Dye - Sensitized Solar Cells : ChemPhysChem, Vol.20, pp.2689 - 2695, 2019

【4905 工学基礎】

33. 三澤 亮太, 西村 直志 : Burton-Miller の定式化と同一の複素固有値を持つ Nyström 法に適した 2 次元 Helmholtz 方程式の境界積分方程式について: 計算数理工学論文集, Vol.19, pp.61 - 66, 2019

【5001 機械材料・材料力学】

34. 金崎真人, 北口尚紀, 西川雅章, 北條正樹 : 融点近傍における CF/PA6 一方向板の粘度と流動特性の関係 : 日本複合材料学会誌, Vol.44, No.5, pp.173 - 182, 2018
35. 若山航瑤, 松田直樹, 加藤久弥, 北條正樹, 西川雅章 : 擬似等方積層 CFRP の圧縮破壊における面外方向せん断応力の影響 : 第 10 回日本複合材料会議 (JCCM-10) 講演論文集, 2019
36. 三村俊太, 阿部拓真, 日下貴之, 森直樹, 高木清嘉, 北條正樹, 西川雅章, 松田直樹 : CFRP 接着接合継手の非線形変形を考慮した強度解析モデリング : 第 10 回日本複合材料会議 (JCCM-10) 講演論文集, 2019
37. M. Nishikawa, Y. Naito, N. Matsuda, M. Hojo : Finite element modeling of layup process with heat transfer and deformation process of CFRTP : Proc. 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM22) , 2019
38. Y. Abo, Y. Tanaka, M. Nishikawa, M. Iwashita, K. Yamada, K. Kawabe, M. Nishi, N. Matsuda, M. Hojo : Simulation and experiments of mechanical properties dominating the press molding using CFRTP preforms : Proc. 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM22) , 2019
39. S. Mimura, T. Abe, T. Kusaka, N. Mori, K. Takagi, M. Hojo, M. Nishikawa, N. Matsuda : Numerical Modeling of Adhesively Bonded CFRP Joints Considering the Non-Linear Deformation of the Adhesive Layers : Proc. 22nd International Conference on Composite Materials 2019 (ICCM22) , 2019
40. Masaaki Nishikawa, Kohei Yamada, Satoru Yamamoto, Manato Kanasaki, Naoki Matsuda, Kazumasa Kawabe, Masaki Hojo : Elastic-plastic finite element analysis on three-point bending tests for thin-ply CFRP laminates : Proc. 16th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (JISSE-16), 2019
41. 三村俊太, 稲員翔平, 日下貴之, 高木清嘉, 北條正樹, 西川雅章, 松田直樹 : CFRP 接着接合継手における接着剤及び被着体の破壊予測モデルに関する研究 : 第 44 回複合材料シンポジウム

- 講演論文集, 2019
42. 田中陽祐, 阿保勇治, 西川雅章, 岩下美和, 山田耕平, 川邊和正, 松田直樹, 北條正樹: 熱可塑性 CFRP 中間基材の賦形プロセスにおけるせん断変形特性の実験的および解析的検討: 第57回飛行機シンポジウム 講演論文集, 2019
 43. Y. Abo, Y. Tanaka, M. Nishikawa, M. Iwashita, K. Yamada, K. Kawabe, M. Nishi, N. Matsuda, M. Hojo: Experimental evaluation of formability in preforming process using CFRTP preforms: 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials (RJCM-1), 2019
 44. Masaaki Nishikawa, Naoki Matsuda, Masaki Hojo: Approaches to damage modeling for advanced composite materials and structures based on peridynamics: 1st Russia-Japan Joint Workshop on Composite Materials (RJCM-1), 2019
 45. 阿保勇治, 田中陽介, 西川雅章, 岩下美和, 山田耕平, 川邊和正, 西 正人, 松田直樹, 北條正樹: LS-DYNA による熱可塑性 CFRP 中間基材の賦形解析: JSOLCAE フォーラム ポスター発表, 2019
- 【5004 流体工学】
46. 菅野 雅也, 横嶋 哲: 壁乱流における壁の空隙特性と流れ特性の関係: 第 65 回理論応用力学講演会・第 22 回応用力学シンポジウム, pp.C000178, 2019
 47. 菅野 雅也, 横嶋 哲: メッシュ状透過性境界を有するチャネル乱流 DNS における計算領域サイズと空間解像度依存性: 日本機械学会 東海支部 第 69 期総会・講演会 講演論文集, No.203-1, pp., 2020
 48. Haruhiko Shirai · Hiromichi Mitamura · Nobuaki Arai · Kazuyuki Moriya: Study of energy harvesting from low frequency vibration with ferromagnetic powder and non-magnetic fluid: *Plasmocs* (Springer), Vol.14, No.6, pp.1557-1963(Online), 2019
 49. Umair Ahmed, Abhishek L. Pillai, Nilanjan Chakraborty, Ryoichi Kurose: Statistical behavior of turbulent kinetic energy transport in boundary layer flashback of hydrogen-rich premixed combustion: *Physical Review Fluids*, Vol.4, No.10, pp.103201 -, 2019
- 【5202 構造工学・地震工学・維持管理工学】
50. 相馬 悠人: 界面の摩擦接触を考慮した損傷モデルによる鉄筋コンクリートの破壊シミュレーション: *土木学会論文集 A2(応用力学)*, Vol.75, No.2, pp.I_165~I_173, 2020
 51. 浅井光輝, 原倅平, 磯部大吾郎, 田中聖三: ASI-Gauss 法による骨組み崩壊解析に基づく阿蘇大橋崩壊メカニズムの推定: *構造工学論文集*, Vol.66A, pp.59~69, 2020
 52. Kohei Hara, Mitsuteru Asai, Daigoro Isobe, Seizo Tanaka: Application of ASI-Gauss code for wooden houses collapse analysis of entire city by earthquake and tsunami: *Proceedings of 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics*, 2019
- 【5401 金属物性】
53. T. Gake, Y. Kumagai, and F. Oba: First-principles study of self-trapped holes and acceptor impurities in Ga₂O₃: *Phys. Rev. Mater.*, Vol.3, No.4, pp.044603-1 - 044603-11, 2019
 54. Y. Hinuma, T. Gake, and F. Oba: Band alignment at surfaces and heterointerfaces of Al₂O₃, Ga₂O₃, In₂O₃, and related group-III oxide polymorphs: A first-principles study: *Phys. Rev. Mater.*, Vol.3, No.8, pp.084605-1 - 084605-11, 2019
 55. Y. Kuroiwa, Y. Matsushita, K. Harada, and F. Oba: Theoretical prediction of strain-induced carrier effective mass modulation in 4H-SiC and GaN: *Appl. Phys. Lett.*, Vol.115, No.11, pp.112102-1 - 112102-5, 2019
 56. N. Tsunoda, Y. Kumagai, and F. Oba: Stabilization of small polarons in BaTiO₃ by local distortions: *Phys. Rev. Mater.*, Vol.3, No.11, pp.114602-1 - 114602-6, 2019
 57. T. Nagai, Y. Mochizuki, H. Shirakuni, A. Nakano, F. Oba, I. Terasaki, and H. Taniguchi: Phase transition from weak ferroelectricity to incipient ferroelectricity in Li₂Sr(Nb_{1-x}Tax)₂O₇: *Chem. Mater.*, Vol.32, No.2, pp.744 - 750, 2020

58. T. Gake, Y. Kumagai, C. Freysoldt, and F. Oba : Finite-size corrections for defect-involving vertical transitions in supercell calculations : Phys. Rev. B, Vol.101, No.2, pp.020102(R)-1 - 020102(R)-5, 2020
【5402 無機材料・物性】
59. Hinuma, Y.; Gake, T.; Oba, F. : Band alignment at surfaces and heterointerfaces of Al₂O₃, Ga₂O₃, In₂O₃, and related group-III oxide polymorphs: A first-principles study. : Phys. Rev. Mater., Vol.3, No.84605, 2019
【5406 金属生産工学】
60. Takuya Yamamoto, Wataru Kato, Sergey Komarov, Yasuo Ishiwata : Investigation on the surface vortex formation during mechanical stirring with an axial-flow impeller used in an aluminum process : Metallurgical and Materials Transactions B, Vol.50B, pp. 2547- 2556, 2019
61. Kenya Kato, Takuya Yamamoto, Sergey V. Komarov, Ryosuke Taniguchi, Yasuo Ishiwata : Evaluation of Mass Transfer in an Aluminum Melting Furnace Stirred Mechanically during Flux Treatment : Materials Transactions, Vol.60, No.9, pp.2008 - 2015, 2019
62. 山本卓也、コマロフセルゲイ : アルミニウム脱ガス装置内気泡分裂挙動の解明: 第 112 回軽金属シンポジウム 「アルミニウム溶湯処理・溶湯品質評価方法」 概要集, 2019
63. 山本卓也、コマロフセルゲイ、石渡保生 : 異なる翼端渦条件におけるアルミニウム機械攪拌中気泡分裂挙動の解明: 軽金属学会第 137 回秋期大会 概要集, 2019
64. 山本卓也 : 数値シミュレーションによるアルミニウム溶湯処理の視覚化と定量化 : 軽金属学会第 137 回秋期大会 概要集, 2019
【5501 化工物性・移動操作・単位操作】
65. Takashi Horiuchi, Lei Wang, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano, Takuya Yamamoto, Toru Ujihara, and Sadik Dost. : The effect of crucible rotation and crucible size in top-seeded solution growth of single crystal silicon carbide : Crystal Research and Technology, Vol.54, No.5, pp.1900014 (6p), 2019
66. Takashi Horiuchi, Lei Wang, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano, Toru Ujihara, and Sadik Dost : Adjoint-based sensitivity analysis for the optimal crucible temperature profile in the RF-Heating TSSG-SiC crystal growth process : Journal of Crystal Growth, Vol.517, pp.59 - 63, 2019
67. J.G. Zhang, T. Yoshimura, A. Sekimoto, T. Ban, Y. Okano, H. Khodamoradi, T. Ujihara, S. Dost : Numerical simulation of the transport phenomena occurring in the Bottom Seeded Solution Growth (BSSG) process of SiC : 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCChE2019), 2019
【5601 航空宇宙工学】
68. Kengo Nakamura, Hiroyuki Koizumi, Masakatsu Nakano, and Yoshinori Takao : Effects of negative ions on discharge characteristics of water plasma source for a miniature microwave discharge ion thruster : Physics of Plasmas, Vol.26, No.4, pp.043508-1 - 043508-10, 2019
69. Yosuke Sato, Hiroyuki Koizumi, Masakatsu Nakano, and Yoshinori Takao : Electron extraction enhancement via the magnetic field in a miniature microwave discharge neutralizer : Journal of Applied Physics, Vol.126, No.24, pp.243302-1 - 243302-12, 2019
【6801 化学系薬学】
70. Nanjo, T.; Zhang, X.; Tokuhiko, Y.; Takemoto, Y. : Divergent and Scalable Synthesis of α -Hydroxy/Keto- β -amino Acid Analogues by the Catalytic Enantioselective Addition of Glyoxylate Cyanohydrin to Imines : ACS catal., Vol.9, pp.10087 - 10092, 2019
【9999 その他】
71. Hidetoshi Kono, Shun Sakuraba and Hisashi Ishida : Free energy profile for unwrapping outer superhelical turn of CENP-A nucleosome : Biophysics and Physicobiology, Vol.16, pp.337 - 343, 2019

別表1 スーパーコンピュータシステム

			利用負担額	提供サービス						
コース	タイプ	セット		システム	バッチ	システム資源	経過時間 (時間)	ストレージ (TB)	無料 利用者数	
エントリ	-	基本	12,600 円/年	B	共有	最大1ノード相当((36コア、128GBメモリ)×1)	1	0.2	-	
パーソナル	タイプA	基本	100,000 円/年	A	共有	最大4ノード相当((68コア、16+96GBメモリ)×4)	168	3.0	-	
	タイプB	基本	100,000 円/年	B	共有	最大4ノード相当((36コア、128GBメモリ)×4)		3.0		
	タイプC	基本	100,000 円/年	C	共有	最大1ノード相当((72コア、3072GBメモリ)×1)		3.0		
グループ	タイプA1	最小	200,000 円/年	A	優先	4ノード((68コア、16+96GBメモリ)×4)	336	24.0	8	
		追加単位	100,000 円/年			2ノード((68コア、16+96GBメモリ)×2)		12.0	4	
	タイプA2	最小	240,000 円/年		準優先	8ノード((68コア、16+96GBメモリ)×8)		28.8	16	
		追加単位	60,000 円/年			2ノード((68コア、16+96GBメモリ)×2)		7.2	4	
	タイプA3	最小	600,000 円/年		占有	8ノード((68コア、16+96GBメモリ)×8)		48.0	16	
		追加単位	300,000 円/年			4ノード((68コア、16+96GBメモリ)×4)		24.0	8	
	タイプB1	最小	210,000 円/年	B	優先	4ノード((36コア、128GBメモリ)×4)		24.0	8	
		追加単位	105,000 円/年			2ノード((36コア、128GBメモリ)×2)		12.0	4	
	タイプB2	最小	252,000 円/年		準優先	8ノード((36コア、128GBメモリ)×8)		28.8	16	
		追加単位	63,000 円/年			2ノード((36コア、128GBメモリ)×2)		7.2	4	
	タイプB3	最小	630,000 円/年		占有	8ノード((36コア、128GBメモリ)×8)		48.0	16	
		追加単位	315,000 円/年			4ノード((36コア、128GBメモリ)×4)		24.0	8	
	タイプC1	最小	130,000 円/年	C	優先	1ノード((72コア、3072GBメモリ)×1)		24.0	8	
		追加単位	130,000 円/年			1ノード((72コア、3072GBメモリ)×1)		24.0	8	
タイプC2	最小	156,000 円/年	準優先		2ノード((72コア、3072GBメモリ)×2)	28.8	16			
	追加単位	78,000 円/年			1ノード((72コア、3072GBメモリ)×1)	14.4	8			
大規模ジョブ	タイプA	最小	20,000 円/週(7日)		A	占有	8ノード((68コア、16+96GBメモリ)×8)	168	-	-
		追加単位	10,000 円/週(7日)				4ノード((68コア、16+96GBメモリ)×4)			
	タイプB	最小	21,000 円/週(7日)	B	占有	8ノード((36コア、128GBメモリ)×8)				
		追加単位	10,500 円/週(7日)			4ノード((36コア、128GBメモリ)×4)				
	タイプC	最小	13,000 円/週(7日)	C	占有	2ノード((72コア、3072GBメモリ)×2)				
		追加単位	6,500 円/週(7日)			1ノード((72コア、3072GBメモリ)×1)				
専用クラスター	-	最小	630,000 円/年	B	-	8ノード((36コア、128GBメモリ)×8)	-	48.0	16	
		追加単位	315,000 円/年			4ノード((36コア、128GBメモリ)×4)	-	24.0	8	
ストレージ容量追加			10,000 円/年	ストレージ容量10TBの追加につき						
ライセンスサービス			20,000 円/年	可視化ソフト(AVS,ENVI/IDL)およびプリポストウェアの1ライセンスにつき						

備考

- 利用負担額は、年度単位で算定している。また、総額表示である。パーソナルコース、グループコース又は専用クラスターコースを、年度途中から利用を開始する場合及び年度途中で利用を終了する場合の利用負担額は、上記表中の利用負担額を12で除した後、利用月数を乗じて算出するものとし、100円未満に端数が出た場合は、10円単位を四捨五入するものとする。
なお、月途中から利用を開始する場合及び月途中で利用を終了する場合は、それぞれ1月の利用とする。
- 大型計算機システムの全ての利用者は、上記表のサービスの他、次のサービスを受けることができる。
 - 大判プリンタサービス
 - その他、大型計算機システムが提供するサービス、機器の利用
- 上記表の大規模ジョブコース、ストレージ容量追加、ライセンスサービスの申請には、スーパーコンピュータシステムの利用者であることが必要である。
- 「共有」：当該カテゴリのユーザ間で一定の計算資源を共有するベストエフォートのスケジューリングを行う。
「準優先」：定常稼働状況において記載値(以上)の計算資源が確保されるように優先スケジューリングを行う。
また、稼働状況によらず記載値の1/4の計算資源が確保されることを保証する。
「優先」：定常稼働状況において記載値(以上)の計算資源が確保されるように優先スケジューリングを行う。
また、稼働状況によらず記載値の1/2の計算資源が確保されることを保証する。
「占有」：稼働状況によらず記載値の計算資源が確保されることを保証する。
- ストレージ容量はバックアップ領域(最大で総容量の1/2)を含む。
- グループコース及び専用クラスターコースの利用者番号は利用者あたり年額5,000円を負担することで追加できる。
- 機関・部局定額制度
他機関又は学内における部局(『国立大学法人京都大学の組織に関する規程』第3章第2節から第11節で定める組織をいう。)の組織が、その組織単位でグループコースサービスを利用申請する場合の利用負担額は、別表1に規定する1.5倍の額とする。なお、利用負担額が年額150万円未満の場合は100人、年額150万円を超える場合は、150万円毎に100人までの利用者を超えることを認める。ストレージは、1.5倍の容量とする。
- スパコン連携サービス
学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータシステムと密な連携により、学内における部局の組織が計算サーバ等を設置する場合、下記の負担額を支払うものとする。

冷却方式	利用負担額	利用負担額算定単位
水冷	9,800 円/月	水冷冷却方式の計算サーバ等の定格電力 1kWにつき
空冷	11,500 円/月	空冷冷却方式の計算サーバ等の定格電力 1kWにつき

別表2 汎用コンピュータシステム

区 分	利用負担額	単 位
仮想サーバ ホスティングサービス	36,000円／年	1仮想サーバにつき

備考

1. 利用負担額は、総額表示である。
2. 上記表の仮想サーバホスティングサービスを利用するには、スーパーコンピュータシステムの利用者であること。
3. 1仮想サーバに割当ててるシステム資源は、CPU:2コア、メモリ:4GB、ディスク:100GBである。
4. 仮想サーバホスティングサービスにおいて、下記の負担額を支払うことによりCPU、メモリ、ディスクを増量することができる。

区 分	利用負担額	単 位
CPU増量	3,000円／年	2コアにつき(最大8コアまで)
メモリ増量	3,000円／年	4GBにつき(最大64GBまで)
ディスク増量	6,000円／年	100GBにつき(最大1,000GBまで)

5. 利用負担額は、当該年度(4月から翌年3月まで)の利用に対して年額として算定するが、年度途中から利用を開始する場合には月数に応じて減額する。

別表3 スーパーコンピュータシステム

システム	システム資源	経過時間 (時間)	ストレージ (TB)	無料 利用者数	利用負担額
A	8ノード(68コア、16+96GBメモリ)×8)	336	28.8	16	960,000 円/年
	12ノード(68コア、16+96GBメモリ)×12)	336	43.2	24	1,440,000 円/年
	16ノード(68コア、16+96GBメモリ)×16)	336	57.6	32	1,920,000 円/年
B	8ノード(36コア、128GBメモリ)×8)	336	28.8	16	1,008,000 円/年
	12ノード(36コア、128GBメモリ)×12)	336	43.2	24	1,512,000 円/年
	16ノード(36コア、128GBメモリ)×16)	336	57.6	32	2,016,000 円/年
C	2ノード(72コア、3072GBメモリ)×2)	336	28.8	16	624,000 円/年
	3ノード(72コア、3072GBメモリ)×3)	336	43.2	24	936,000 円/年
	4ノード(72コア、3072GBメモリ)×4)	336	57.6	32	1,248,000 円/年

備考

1. 利用負担額は、年度単位で算定している。また、総額表示である。パーソナルコース、グループコース又は専用クラスターコースを、年度途中から利用を開始する場合及び年度途中で利用を終了する場合の利用負担額は、上記表中の利用負担額を12で除した後、利用月数を乗じて算出するものとし、100円未満に端数が出た場合は、10円単位を四捨五入するものとする。
なお、月途中から利用を開始する場合及び月途中で利用を終了する場合は、それぞれ1月の利用とする。
2. ストレージ容量はバックアップ領域(最大で総容量の1/2)を含む。

— サービス利用のための資料一覧 —

1. スーパーコンピュータシステム・ホスト一覧

- システム A : camphor.kudpc.kyoto-u.ac.jp
- システム B・C : laurel.kudpc.kyoto-u.ac.jp
 - システム B (SAS 利用時) : sas.kudpc.kyoto-u.ac.jp

※ ホストへの接続は SSH(Secure SHell) 鍵認証のみ、パスワード認証は不可

2. 問い合わせ先 & リンク集

- 情報環境機構のホームページ
<http://www.iimc.kyoto-u.ac.jp/>
- 学術情報メディアセンターのホームページ
<http://www.media.kyoto-u.ac.jp/>
- スーパーコンピュータシステムに関する問い合わせ先
 - 利用申請などに関する問い合わせ先
【情報環境支援センター】
E-mail : zenkoku-kyo@media.kyoto-u.ac.jp / Tel : 075-753-7424
URL: <http://www.iimc.kyoto-u.ac.jp/ja/services/comp/>
 - システムの利用など技術的な問い合わせ先
【スーパーコンピューティング掛】
E-mail : consult@kudpc.kyoto-u.ac.jp / Tel : 075-753-7426
URL: <http://www.iimc.kyoto-u.ac.jp/ja/services/comp/contact.html>

京都大学学術情報メディアセンター全国共同利用版広報 Vol. 19, No. 2

2021年 1月 29日 発行

編集者 京都大学学術情報メディアセンター
全国共同利用版広報編集部会
発行者 〒606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学学術情報メディアセンター
Academic Center for Computing and Media Studies
Kyoto University
Tel. 075-753-7407
<http://www.media.kyoto-u.ac.jp/>
印刷所 〒616-8102 京都市右京区太秦森ヶ東町 21-10
株式会社エヌジーピー

広報編集部会

深沢 圭一郎 (部会長)

平石 拓 (副部会長)

熊谷 真由美

尾形 幸亮

表紙デザイン：中山 豊

(中山商店)

目次

【巻頭言】

- ・ Vol.19, No.2号の発刊に当たって 深沢 圭一郎 1

【FX700計算サーバ性能評価】

- ・ 惑星磁気圏MHDシミュレーションコードによるA64FXプロセッサ(FX700)の性能評価 深沢 圭一郎 3

【JHPCN研究紹介】

- ・ JHPCNが拓くビッグデータサイエンス：高速データ伝送技術 村田 健史, 深沢 圭一郎 12

【サービスの記録・報告】

- ・ スーパーコンピュータシステムの稼働状況 19
- ・ センター利用による研究成果(令和元年度) 22

【資料】

- ・ 大型計算機システム利用負担金 別表 28
- ・ サービス利用のための資料一覧 31

【奥付】

- ・ 奥付 32