

科学研究費助成事業 基盤研究(S)

「10億並列・エクサスケール スーパーコンピュータの耐故障性基盤」 (2011年度採択)

1) 研究概要

スーパーコンピュータはその規模とスピードが指数的に上昇しており、2018-2020年ごろには、エクサ(10^{18})フロップス・10億並列のマシンが登場すると目されているが、多種多様なコンポーネントも指数的に増加し、故障発生率の増大が危惧されている。そのため、我々はエクサスケール・スーパーコンピュータ実現のための耐故障性基盤を確立する。

2) 研究背景

科学技術分野において、気象予報、地震及び津波伝播予測などのシミュレーションは、理論・実験に続く「第3の手法」として盛んに行われており、大規模なシミュレーションではスーパーコンピュータ(スパコン)が不可欠となっている。近年、計算需要の指数的な増加と共に、年々、スパコンはその規模とスピードが指数的に上昇しており、2018-2020年ごろには、エクサ(10^{18})フロップス・10億並列のマシンが登場すると目されている。

3) 研究目的

エクサスケールスーパーコンピュータでは、搭載されるCPUやメモリなど、多種多様なコンポーネントも指数的に増加し、仮に各コンポーネントの信頼性が現在の数倍になったとしても、全体の障害発生率は数十倍近くとなる。これは、全てのコンポーネントが正常に稼動する時間間隔が平均で十分以下不足であることに相当し、エクサスケールシステムでは、マシンが実質的に動作しなくなる。これを解決するために、様々な耐障害技術が提案されているが、エクサスケールシステムへの適用は難しい。我々は、TSUBAME2.0/2.5及びその後継として予定されているTSUBAME3.0を利用し、10億並列・エクサスケールコンピュータの耐障害性基盤の実現を目指す。

4) 研究方法

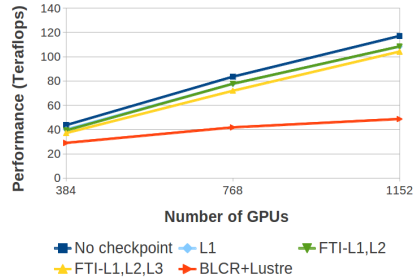
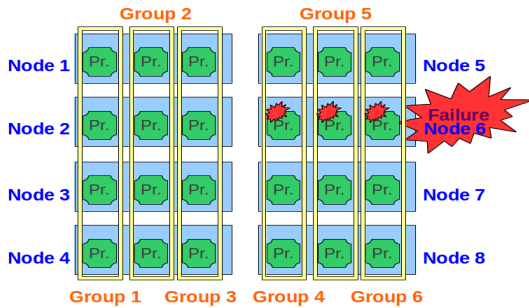
10億並列・エクサスケールスパコンの耐故障性基盤を確立する。この目的を実現するために、(1)エクサスケールシステムに適した耐故障の複合的数理モデルおよびその検証、(2)超細粒度並列・ヘテロジニアス計算環境に適した新しい耐故障手法の確立、(3)耐故障システムのオーバーヘッドの削減、(4)エクサスケールシステムに対応しうる障害復旧機構の考案、(5)システム統合と性能評価を行う。

5) これまでの成果

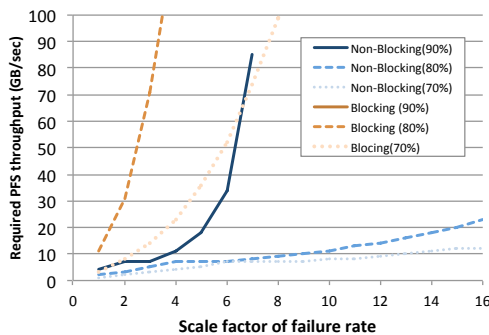
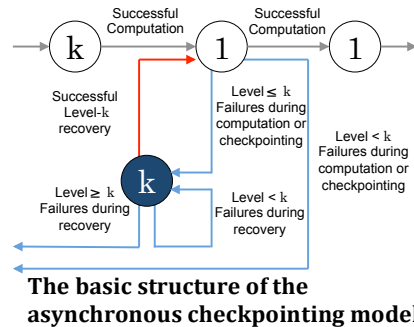
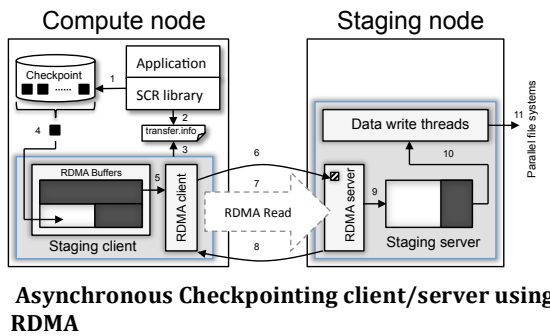
我々は10億並列・エクサスケールスーパーコンピュータの耐故障性基盤の確立のため、主に研究の方法(1)~(3)を行ってきた。

本研究の成果として、まずチェックポイントデータのリード・ソロモン符号化とTSUBAME2.0などに搭載されたローカル・ストレージを活用することにより、スケラブルなチェックポイントを実現するFTI(Fault Tolerance Interface)を開発した。実際に、地震伝播アプリケーションSPECFEM3Dを用いて、東日本大震災を想定したシミュレーションを実際にTSUBAME2.0で実行し、実アプリケーションに於いてチェックポイントの有効性を検証した[1]。特に、ここでの研究成果は、SC11において、ベストペーパー賞に相当するSpecial Recognition Award for Perfect Scoreを受賞した[7]。また、FTIを

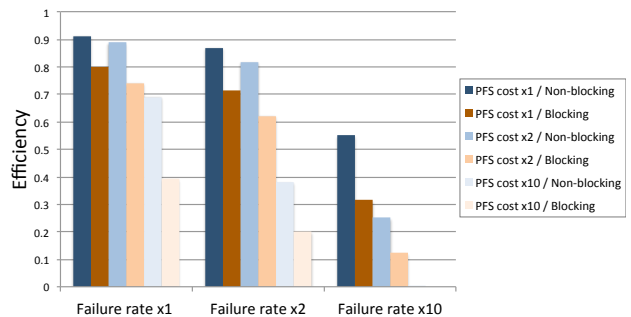
拡張し、メッセージロギング技術と統合した。メッセージロギング時のグループと、チェックポイントの冗長符号化時のグループを、ネットワークのトポロジーを考慮して、階層的にグルーピングすることにより、従来に比べ、細粒度超並列計算を要する津波シミュレーションコードにおいて、より効率的なチェックポイントを実現した[2]。ここで開発された FTI は、オープンソースとして公開している[10]。



一般に並列ファイルシステムは、チェックポイント先として最も信頼性が高い場所であるが、一方で並列ファイルシステムを用いた階層型チェックポイントでは、数百 GPU 実行において、性能向上が飽和してしまい、エクサフロップに向けてのスケールアップは困難であったが、計算とは非同期的に並列ファイルシステムへチェックポイントを書き出し、また、複合的数値モデルを用いて、最適な頻度でチェックポイントを行うことにより、オーバーヘッドを削減した。実際に、津波のシミュレーションなど多くの流体計算でみられる等方メッシュの差分法による直接解法を行う Himeno ベンチマークにおいて、従来型の階層型チェックポイントに比べ最大で 1.1~1.8 倍以上の効率化を実現した[3]。また、この最適頻度の自動化も行った[4]。

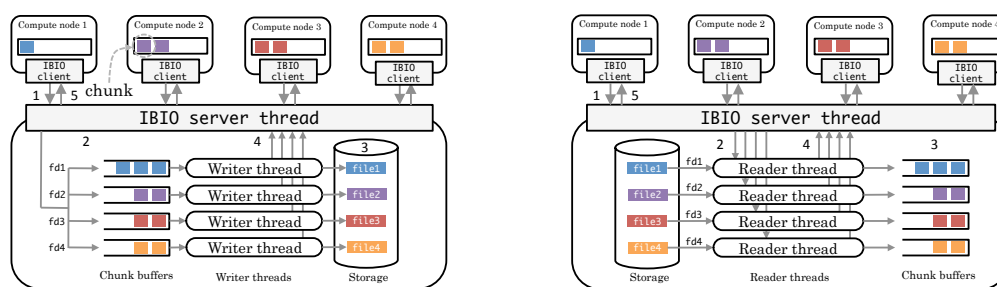


Required PFS throughput at different failure rates

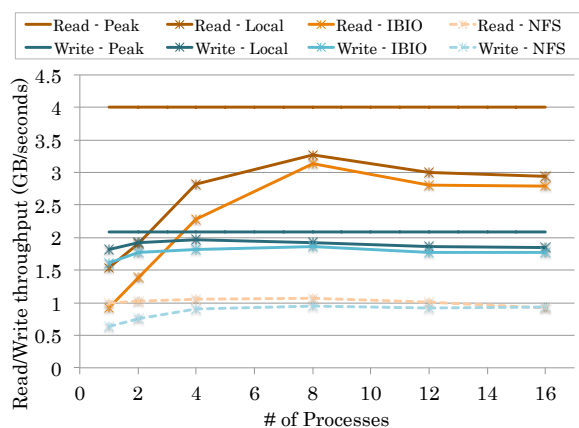


Efficiency of synchronous and asynchronous checkpointing

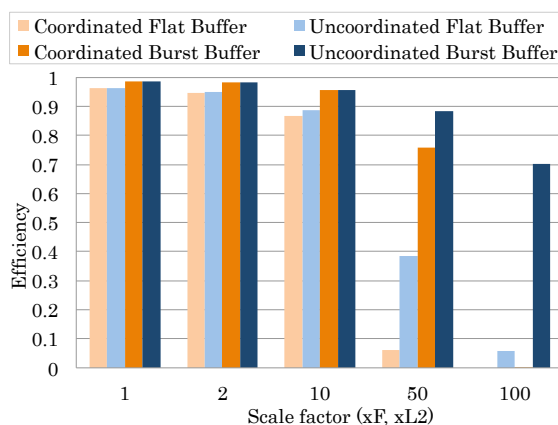
将来の高信頼スーパーコンピュータの実現に向けて、バースト・バッファを備えた、階層型ストレージの信頼性や Coordinated、Uncoordinated チェックポイントなどの既存手法の適用性を複数のシステムを対象とした検証実験を行った。これは、[3]の階層型チェックポイントの複合的数理モデルをベースとしており、これと制限付き自由文脈文法を用いたストレージ・モデルと組み合わせることで、より多くのアーキテクチャに対応可能なモデルへと拡張した。このモデルを用いた検証では、バースト・バッファと Uncoordinated チェックポイントを併用することにより、従来型のストレージ・アーキテクチャ及びチェックポイント手と比べ、数十倍の効率化が実現できることを定量的に立証した[5]。



IBIO Write/Read : four IBIO clients and one IBIO server

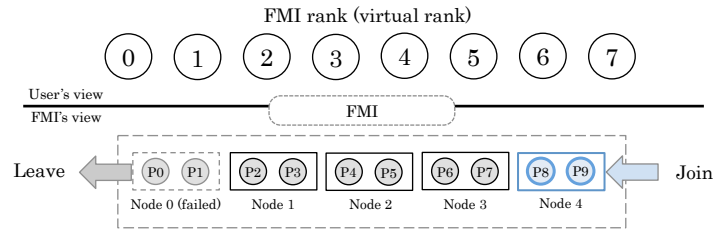


Sequential read and write throughput of local I/O, and I/O with IBIO and NFS via FDR InfiniBand networks



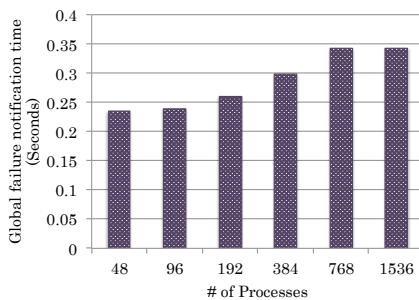
Efficiency of multilevel coordinated and uncoordinated checkpoint/restart on a flat buffer system and a burst buffer system

また、自律的復旧機構のために、多くの科学技術アプリケーションの並列化のために利用されている MPI をベースとした耐障害性・通信ライブラリ FMI (Fault Tolerant Messaging Interface)を開発し、高速かつスケラブルな自律的復旧を実現した[6]。

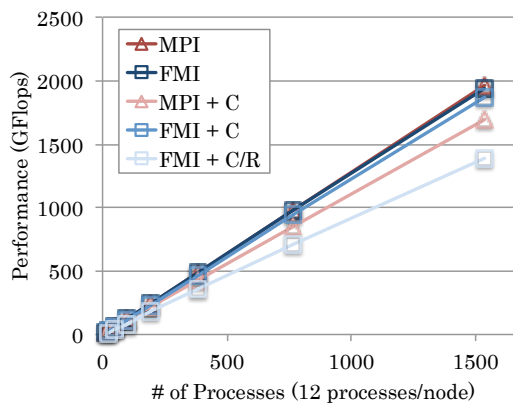


Overview of FMI

	1-byte Latency	Bandwidth (8MB)
MPI	3.555 usec	3.227 GB/s
FMI	3.573 usec	3.211 GB/s



Failure notification time with log-ring overlay network



Himeno benchmark (Checkpoint size : 821MB/node, MTBF : 1 minute)

6) 発表論文

[1] L. Bautista-Gomez, N. Maruyama, D. Komatitsch, S. Tsuboi, F. Cappello, S. Matsuoka and T. Nakamura, "FTI: High Performance Fault Tolerance Interface for Hybrid Systems", International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC11), pp.32:1-32:32, 2011

[2] L. Bautista-Gomez, T. Ropars, N. Maruyama, F. Cappello and S. Matsuoka, "Hierarchical Clustering Strategies for Fault Tolerance in Large Scale HPC Systems", International Conference on Cluster Computing 2012 (Cluster'12), pp.355-363, 2012

[3] K. Sato, A. Moody, K. Mohror, T. Gamblin, B. R. de Supinski, N. Maruyama and S. Matsuoka, "Design and Modeling of a Non-blocking Checkpointing System", International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis 2012 (SC12), pp.19:1-19:10, 2012

[4] 實本 英之, 鴨志田良和, "適切なチェックポイント周期を与えるアプリケーションレベルチェックポイントライブラリ", 情報処理学会研究報告 2013-HPC-139(10), pp.1-7, 2013.

[5] K. Sato, K. Mohror, A. Moody, T. Gamblin, B. R. de Supinski, N. Maruyama and S. Matsuoka, "A User-level Infiniband-based File System and Checkpoint Strategy for Burst Buffers", International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid2014), 2014 (to appear)

[6] K. Sato, A. Moody, K. Mohror, T. Gamblin, B. R. de Supinski, N. Maruyama and S. Matsuoka, "FMI: Fault Tolerant Messaging Interface for Fast and Transparent Recovery", International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium 2014 (IPDPS2014), 2014 (to appear)

7) 受賞

[7] Special Certificate of Recognition for achieving a perfect score at the Supercomputing Conference 2011 (SC11) for the paper

[8] Best Paper Award at CCGrid2014, Kento Sato



Best paper award at CCGrid2014

8) その他

[9] <http://matsu-www.is.titech.ac.jp/>

[10] <https://gforge.inria.fr/projects/fti/>