

1

# 計算科学ロードマップ (平成 28 年度版)

2

3

今後の HPCI を使った計算科学発展のための検討会

4

平成 29 年 3 月発行予定



# 目次

1

2	第 3 章	アプリケーションの分類	1
3	3.1	計算機アーキテクチャから見たアプリケーションの分類 . . . . .	2
4	3.2	ミニアプリとの対応 . . . . .	3



## <sup>1</sup> 第3章

# <sup>2</sup> アプリケーションの分類

### <sub>1</sub> 3.1 計算機アーキテクチャから見たアプリケーションの分類

## 3.2 ミニアプリとの対応

### 3.2.1 はじめに

### 3.2.2 Fiber ミニアプリ

Fiber ミニアプリ集 (Fiber Miniapp Suite) [1] は、理化学研究所および東京工業大学にて実施した「将来の HPCI システムのあり方の調査研究「アプリケーション分野」」 [2] (以下、アプリ FS と呼ぶ) において整備開発したミニアプリ群をまとめたものである。アプリ FS 参加者から提供化されたアプリケーションプログラムをベースに、その開発者の協力のもとで、完成後の一般公開を前提に、ミニアプリの整備開発が行われた。最終的には、著作権的に問題のあったもの、性能面で問題のあったもの、オリジナル開発者からのサポートが期待できなくなったものを除いた、8 つのミニアプリを現在 Web 上で公開している。

Fiber では、前節で示した一般的なミニアプリの共通点の他に、以下のような特徴を持ったミニアプリ集を目指して開発整備を行った。

- 容易にインストール、容易に実行
- 正しくインストールされ、正しく実行されていることが検証できるテスト
- 性能計測に使える入力データセット
- インストール・実行方法、使用アルゴリズム説明だけでなく、将来 (2018~2020 年頃) の想定問題規模とそこでの目標性能に関する記述を含めたドキュメントの整備

また、その開発経緯により、ミニアプリ化されたアプリケーションは全て国内で開発されたものであり、また、京コンピュータなど国内固有のアーキテクチャ上でのインストール・実行が保証されているものとなっている。

以下では、Fiber ミニアプリ集として公開中の各ミニアプリに対して、次の点を中心に簡単に紹介する。

- 計算対象と計算手法
- 使用言語と並列化ライブラリ
- どのようにミニアプリ化したか
- ソースコードサイズ
- 付随する入力データ

#### (i) CCS QCD

ミニアプリ CCS QCD [3][4] は、高エネルギー物理学で用いられる格子量子色力学 (格子 QCD) 計算における、最も計算コストがかかるクォーク伝搬関数の計算部部分を抜き出したものである。CCS QCD では、Wilson 型の作用を用いたクォーク伝搬関数の 4 次元格子上での大規模疎行列連立 1 次方程式を、red/black ordering により前処理をした係数行列に対して、BiCGStab 法により解いている。プログラムは Fortran90 で記述され、並列化は、空間 3 次元に対する MPI 領域分割と OpenMP スレッド並列を

1 行っている。コメント行を除いたソースコードサイズは約 1000 行である。パッケージには、強スケーリ  
2 ングおよび弱スケーリングでの性能計測に対応可能な 6 つの入力データセットが含まれている。

### 3 (ii) FFVC Mini

4 ミニアプリ FFVC Mini は、熱流体解析プログラム FFV-C [5] をベースとしている。Navier-Stokes  
5 方程式を直交等間隔格子上的の有限体積法により離散化し。非圧縮流体として、時間ステップ毎に圧力  
6 Poisson 方程式を反復法により解いている。プログラム全体の制御は C++ で記述されているが、ホッ  
7 トスポット部分は Fortran90 により書かれている。並列化は、空間 3 次元に対する MPI 領域分割と  
8 OpenMP スレッド並列を行っている。ミニアプリ化にともない、計算内容を 3 次元直方体領域内のキャ  
9 ビティフロー問題に特化し、使用アルゴリズムも、時間積分は 1 次精度 Euler 陽解法、対流項は 3 次精度  
10 MUSCL スキーム、反復解法はストライドメモリアクセス型の 2 色 SOR 法に限定している。コメント行  
11 を除いたソースコードサイズは約 9000 行である。ミニアプリ内で、強スケーリングおよび弱スケーリ  
12 ングでの性能計測に対応可能なグリッドデータを自動生成する。

### 13 (iii) NICAM-DC Mini

14 ミニアプリ NICAM-DC Mini は、全地球規模での気象現象をシミュレーションする大気大循環モデル  
15 のアプリケーション NICAM [6] のサブセット NICAM-DC [7] をベースにしている。NICAM-DC は、  
16 NICAM から、より要求 B/F 値が高く、通信回数の 8 割が集中している力学過程 (Dinamical Core) の  
17 みを抜き出したミニアプリとなっている。NICAM-DC では、地球大気の運動を静水圧近似を行わない  
18 Navier-Stokes 方程式で記述し、それを球殻上の三次元格子を用いて有限体積法により離散化して解いて  
19 いる。水平方向の格子は、正二十面体を構成する正三角形要素を再帰的に分割していくことにより得られ  
20 る全球で一様な三角格子を採用している。時間積分は、水平方向は Runge-Kutta 法により陽解法で、鉛  
21 直方向は陰解法として 1 次元 Helmholtz 方程式を離散化した三重対角行列を係数に持つ連立一次方程式  
22 を解くことにより進めている。NICAM-DC は、Fortran90 で記述され、MPI による領域分割並列化がな  
23 されている。コメント行を除いたソースコードサイズは 3 万 5 千行である。パッケージには、強スケー  
24 リングおよび弱スケーリングでの性能計測に対応可能な 5 つの入力データセットが付随している。

### 25 (iv) mVMC Mini

26 ミニアプリ mVMC Mini は、強相関電子系シミュレーションプログラム mVMC [8][9] をベースとし  
27 ている。mVMC は、近藤格子などの多体量子系有効モデルの基底状態の波動関数を多変数変分モンテカル  
28 ロ法により求める。mVMC は、C 言語で記述され、MPI および OpenMP により並列化されている。コ  
29 メント行を除いたソースコードサイズは約 9000 行である。パッケージには、強スケーリングおよび弱ス  
30 ケーリングでの性能計測に対応可能な 2 つの入力データセットが付随している。

### 31 (v) NGS Analyzer Mini

32 ミニアプリ NGS Analyzer Mini のベースとなった NGS Analyzer は、次世代シーケンサーの出力  
33 データを高速に解析し、ヒト個人間の遺伝的差異やがんゲノムの突然変異を高い精度で同定するプログラ  
34 ムである [10]。 (to be written)



### (vi) MODYLAS Mini

ミニアプリ MODYLAS Mini は、古典分子動力学シミュレーションプログラム MODYLAS [11][12] をベースにしている。MODYLAS では、クーロン相互作用を、八分木構造を持つ空間セル上での多重極展開計算により計算する Fast Multipole Method (FMM) 法を採用している。MODYLAS は Fortran90 で記述され、MPI および OpenMP による並列化がなされている。ミニアプリ化にともない、計算対象を水分子系のミクロカノニカル計算に限定している。コメント行を除いたソースコードサイズは 8 千行である。パッケージには、強スケーリングおよび弱スケーリングでの性能計測に対応可能な 3 つの入力データが付随している。

### (vii) NTChem Mini

ミニアプリ NTChem Mini は、第一原理計算にもとづく電子状態計算プログラム NTChem [13] のサブパッケージ NTChem/RI-MP2 [14] をベースにしている。演算は密行列に対する行列行列積演算が中心となる。NTChem/RI-MP2 では、XXXX として計算している。NTChem Mini は、Fortran90 で記述され、MPI および OpenMP により並列化されている。コメント行を除いたソースコードサイズは約 XXX 行である。パッケージには小規模分子系のサンプル入力データのみが付属するが、別途、強スケーリング性能計測に対応可能な入力データを Web ページから入手可能である。

### (viii) FFB Mini

ミニアプリ FFB Mini は、有限要素法による熱流体解析プログラム FrontFlow/blue(FFB) [15][16] をベースにしている。ミニアプリ化にあたり、計算対象を六面体要素による非定常流体解析計算に限定し、その他にもオリジナル FFB に含まれる多くの機能（乱流モデル、キャビテーションモデル、など）を削除した。FFB Mini は Fortran90 で記述され、MPI により領域分割並列化に対応している。また、京コンピュータおよび富士通 FX10 上での、自動並列によるスレッド並列計算に対応している。コメント行を除いたソースコードサイズは約 XXX 行である。ミニアプリ内で、強スケーリングおよび弱スケーリングでの性能計測に対応可能なグリッドデータを自動生成する。

## 3.2.3 その他のミニアプリ関連プロジェクト

海外においても FIBER と同様にミニアプリを整備して性能評価用の共通情報資源として活用しようとする動向がある。

### 3.2.3.1 米国のミニアプリ関連 - CORAL プロジェクト

米国においては米国エネルギー省の管轄下にある Argonne 国立研究所、Lawrence Livermore 国立研究所、Oak Ridge 国立研究所の 3 研究所の HPC 調達共通化にともない、性能評価用に用いられる CORAL ベンチマークが公開されている。[17], [18] CORAL ベンチマークの内 LSMS, CAM-SE, QMCPACK, NAMD を除き、アプリは基本的にミニアプリである。

表 3.1 CORAL benchmarks *tier1* および *tier2* アプリのみ掲載

アプリ名	CORAL によるジャンル分け
LSMS, QBOX, HACC, Nekbone	Scalable Science Benchmarks
CAM-SE, UMT2013, AMG2013, MCB, QMC-PACK, NAMD, LULESH, SNAP, miniFE	Throughput Benchmarks
Graph500, Integer Sort, Hash, SPECint2006	Data-Centric Benchmarks
CLOMP, IOR, CORAL MPI, STREAM, STRIDE, LCALS	Skeleton Benchmarks

- 1 これらのミニアプリ全体で以下の計算負荷を網羅するように選択されている。

表 3.2 CORAL benchmarks Platform Stress Areas

システムの部位	注目する主な計算負荷
計算コア	浮動小数点演算、SIMD/ベクトル化、整数・分岐処理
メモリアクセス	メモリバンド幅、連続・等間隔アクセス、不連続アクセス、大規模メモリ領域
ノード間通信	非局所的 P2P 通信、短いメッセージ、長いメッセージ、集合通信、バイセクションバンド幅
スレッド処理	細粒度スレッド処理

### 2 3.2.3.2 米国のミニアプリ関連 - MANTEVO プロジェクト

- 3 また、米国においてはコデザインを推進するためのミニアプリの開発整備それ自体に主眼をおいたプロ  
 4 ジェクトの試みもあり、ミニアプリを用いた性能モデリングと実際のプラットフォームにおける挙動との  
 5 マッピングが 2009 年あたりから提唱されている。MANTEVO プロジェクトはそのようなプロジェクト  
 6 の一つである。[19] MANTEVO プロジェクトの特徴として、ミニアプリの開発整備は全てフルアプリの  
 7 開発者が行っていることがあげられる。以下に Workshop on Representative Applications 2015 [20] に  
 8 おいて紹介された MANTEVO3.0 ミニアプリのリストを示す。

表 3.3 MANTEVO 3.0 miniApp

アプリ名	計算内容
Cleverleaf	Eulerian on structured grid with AMR
CloverLeaf	Compressible Euler eqns,explicit 2nd order accurate
CoMD	Molecular dynamics(SPaSM)
EpetraBenchmarkTest	Exercises Epetra sparse and dense kernels
HPCCG	Unstructured implicit finiteelement
miniFE	Implicit finite element solver
miniGhost	FDM/FVM explicit (haloexchangefocus)
miniMD	Molecular dynamics(Lennard-Jones)
miniXyce	SPICE-style circuit simulator
miniAMR	Adaptive mesh refinement of an Eulerian mesh
miniSMAC2D	FD 2D incompressible N/S on a structured grid.
PathFinder	Signature search
miniAero	3D unstr FV R-K4th order time, inviscid Roe Flux
TeaLeaf	Solid mechanics

### 3.2.3.3 ヨーロッパのミニアプリ関連 - European Exascale プロジェクト

ヨーロッパにおいては 2013 年から 2016 年にかけて European Exascale Projects (FP7) の活動の中で整備されたアプリケーションがプロトアプリと称されているが、これらはミニアプリと同じ位置づけである。Mini-FEM, BPMF, ExaMD, OASIS3-MCT の各プロトアプリが公開されている。[21]

表 3.4 EXA2CT proto apps

アプリ名	計算内容
Mini-FEM	reproducing the assembly step of 3D FEM unstructured meshes
BPMF	A big data and machine learning proto application
ExaMD	A scalable proto-app library for Molecular Dynamics using the Adaptive Midpoint method
OASIS3-MCT	Coupling code by CERFACS, developed for climate applications

### 3.2.4 2章アプリケーションとミニアプリの対応

公開されている Fiber ミニアプリ と サンプルデータを用いて計算を行った場合の B/F 値、および必要メモリ量を、2章アプリケーション要求性能値この表 [ref はどこ？](#) に重ねた図を図 3.1 に示す。

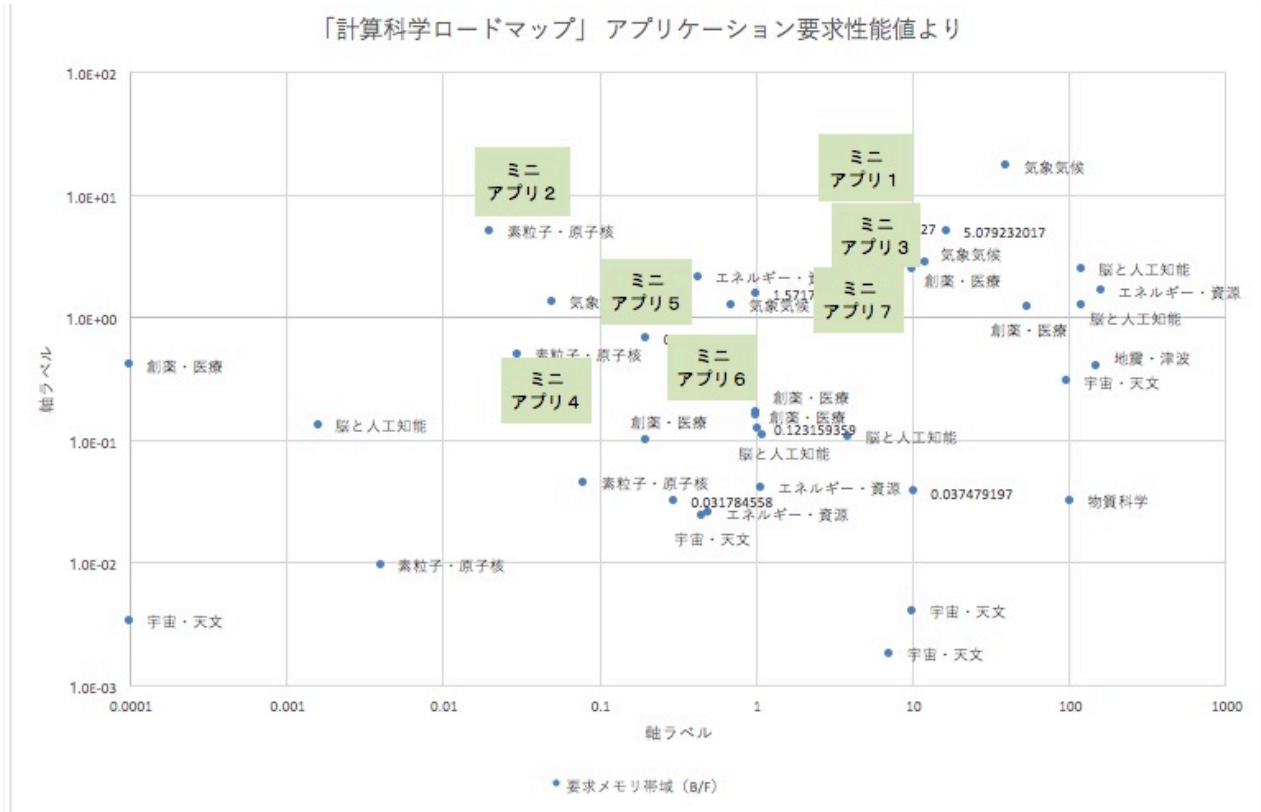


図 3.1 2章アプリケーションとミニアプリの対応

## 1 参考文献

- [1] Fiber MiniApp Suite. <http://fiber-miniapp.github.io/>.
- [2] 将来の HPCI システムのあり方の調査研究「アプリケーション分野」. <http://hpci-aplfs.aics.riken.jp/>.
- [3] T Boku, K-I Ishikawa, Y Kuramashi, K Minami, Y Nakamura, F Shoji, D Takahashi, M Terai, A Ukawa, and T Yoshie. Multi-block/multi-core ssor preconditioner for the qcd quark solver for k computer. *arXiv preprint arXiv:1210.7398*, 2012.
- [4] 寺井優晃, 石川健一, 杉崎由典, 南一生, 庄司文由, 中村宜文, 藏増嘉伸, 横川三津夫. スーパーコンピュータ「京」における格子 qcd の単体性能チューニング. 情報処理学会論文誌. コンピューティングシステム, Vol. 6, No. 3, pp. 43–57, 2013.
- [5] Kenji Ono, Yasuhiro Kawashima, and Tomohiro Kawanabe. Data centric framework for large-scale high-performance parallel computation. *Procedia Computer Science*, Vol. 29, No. 0, pp. 2336 – 2350, 2014.
- [6] Masaki Satoh, Taro Matsuno, Hirofumi Tomita, Hiroaki Miura, Tomoe Nasuno, and Shin-ichi Iga. Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (nicam) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 7, pp. 3486–3514, 2008.

- [7] NICAM-DC. <http://scale.aics.riken.jp/nicamdc/>.
- [8] mVMC. <https://github.com/issp-center-dev/mVMC>.
- [9] Daisuke Tahara and Masatoshi Imada. Variational monte carlo method combined with quantum-number projection and multi-variable optimization. *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 77, No. 11, p. 114701, 2008.
- [10] NGS Analyzer. [http://www.csrp.riken.jp/application\\_d\\_e.html#D2](http://www.csrp.riken.jp/application_d_e.html#D2).
- [11] MODYLAS. <http://www.modylas.org>.
- [12] Yoshimichi Andoh, Noriyuki Yoshii, Kazushi Fujimoto, Keisuke Mizutani, Hidekazu Kojima, Atsushi Yamada, Susumu Okazaki, Kazutomo Kawaguchi, Hidemi Nagao, Kensuke Iwahashi, et al. Modylas: A highly parallelized general-purpose molecular dynamics simulation program for large-scale systems with long-range forces calculated by fast multipole method (fmm) and highly scalable fine-grained new parallel processing algorithms. *Journal of Chemical Theory and Computation*, Vol. 9, No. 7, pp. 3201–3209, 2013.
- [13] NTChem. [http://labs.aics.riken.jp/nakajimat\\_top/ntchem\\_e.html](http://labs.aics.riken.jp/nakajimat_top/ntchem_e.html).
- [14] Michio Katouda and Takahito Nakajima. Mpi/openmp hybrid parallel algorithm of resolution of identity second-order mllerplesset perturbation calculation for massively parallel multicore supercomputers. *Journal of Chemical Theory and Computation*, Vol. 9, No. 12, pp. 5373–5380, 2013.
- [15] 南一生, 井上俊介, 堤重信, 前田拓人, 長谷川幸弘, 黒田明義, 寺井優晃, 横川三津夫. 「京」コンピュータにおける疎行列とベクトル積の性能チューニングと性能評価. ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム論文集, 第 2012 巻, pp. 23–31, jan 2012.
- [16] 熊畑清, 井上俊介, 南一生. Frontflow/blue の勾配計算カーネルのスーパーコンピュータ「京」上でのチューニング. 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム (ACS) , Vol. 6, No. 3, pp. 31–42, sep 2013.
- [17] CORAL benchmark codes. <https://asc.llnl.gov/CORAL-benchmarks/>.
- [18] Argonne-Livermore-OakRidge National Laboratories. Coral procurement benchmarks. In *May 31 CORAL vendor meeting*, pp. 1–15, Sep 2013.
- [19] Mantevo プロジェクト. <https://mantevo.org/>.
- [20] Workshop on representative applications 2015. <http://hepcce.org/files/2015/10/HerouxWRAPKeynote.pdf>.
- [21] The EXA2CT European Project. <http://www.exa2ct.eu/content/proto-apps.html>.
- [22] 計算科学ロードマップ. <http://hpci-aplfs.aics.riken.jp/document.html>, 2014.
- [23] 小村幸浩, 鈴木惣一朗, 三上和徳, 滝澤真一朗, 松田元彦, 丸山直也. Fiber ミニアプリの性能評価. No. 28, jul 2014.