

東京大学のスーパーコンピュータを用いた並列プログラミング教育  
— 工学部・工学系研究科共通科目「スパコンプログラミング（１）および（Ⅰ）」  
（2015年度夏・冬学期）、および、全学ゼミ「スパコンプログラミング研究ゼミ」  
（2015年度冬学期）を通じて —

片桐 孝洋

東京大学情報基盤センター 准教授  
（現）名古屋大学情報基盤センター 教授

## 1. はじめに

計算科学・工学、ハードウェアの急速な発達を背景に、「第3の科学」としての大規模並列シミュレーションへの期待は、産学において一層高まっている。最新ハードウェアを駆使し、大規模並列シミュレーションプログラムを開発するための体系的な教育プログラムの事例は、世界的に見ても少ない。東京大学では2008年初頭から、「T2K オープンスパコン、次世代スーパーコンピュータ等を駆使した大規模シミュレーションを実施し、新しい科学を開拓する人材」を育成するための全学的な教育プログラムとして「学際計算科学・工学 人材育成プログラム」を実施した[1][2]。

一方、東京大学情報基盤センター（以降、センター）では、スーパーコンピュータ（以降、スパコン）の潜在的な新規ユーザである東京大学工学部を主とする学部学生と大学院生に対して高性能計算（HPC）教育の支援を行ってきた。センターのスパコン啓発と、ユーザの研究分野（主として大規模数値シミュレーション分野）における高性能並列プログラム開発の長期的支援を行なうことが目的である。

以上の背景から、本講義は工学部および工学系研究科の共通科目「スパコンプログラミング（１）および（Ⅰ）」を通年科目（夏学期、冬学期）として開講している。2014年冬学期で15回連続の開講となる。本講義は、工学部や工学系研究科以外の学生も受講している。

一方、天才的な学際領域の研究者を早期から養成し、高性能計算分野における優秀な人材を発掘する目的で、東京大学教養学部の学生に対し工学部と同様の講義を行う「スパコンプログラミング研究ゼミ」を開講している。2007年度冬学期に「全学ゼミ」として開講して以来、2014年度夏学期で8回目の開講となった。

双方の受講生に対し、2012年夏学期からは、2012年4月に試験運転を開始した Fujitsu PRIMEHPC FX10（FX10スーパーコンピュータシステム、以降、FX10）の教育利用を、日本において先駆けて開始している。これらは、スーパーコンピューティング系の「教育利用」サービスの一環である[3]。

FX10では、12ノード（192コア）の利用が可能となり、教育利用で使える並列数が大幅に増加した。

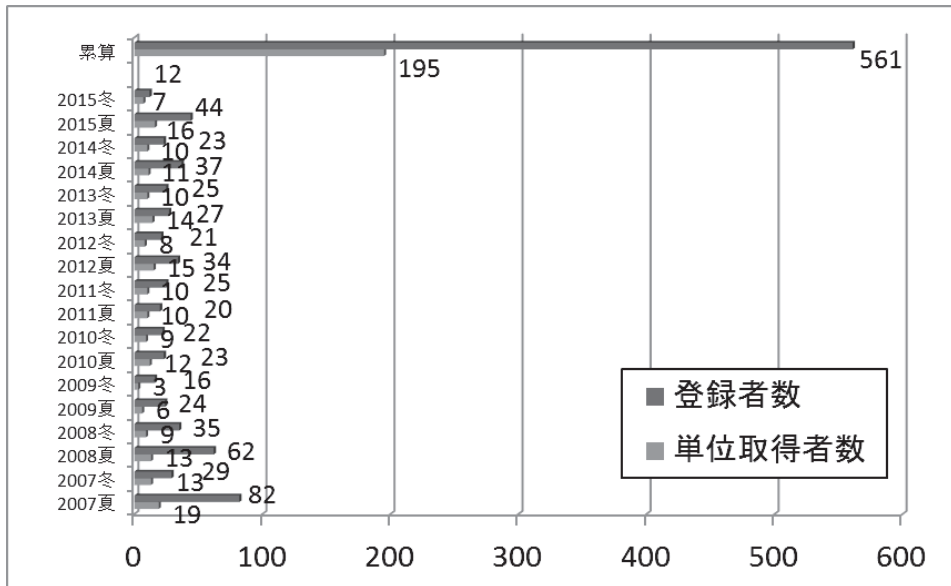
本報告は2014年度の報告[4]に引き続き、2015年度冬学期までの教育利用報告である。

## 2. 受講者に対する統計データ

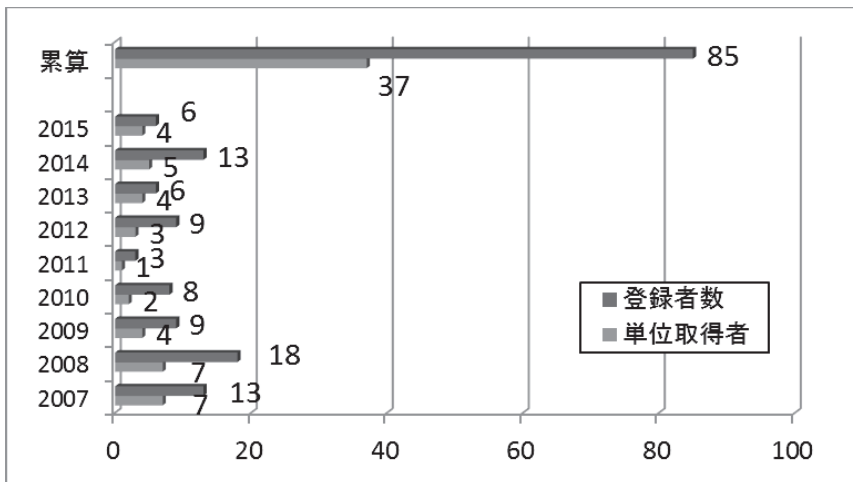
### （１）受講者数

本講義は2007年度から夏学期、冬学期と年2回、連続して開講している。講義に事前登録し

た上でスパコンアカウントを発行した数（登録者数）と、単位を取得した人数（単位取得者数）を図1にのせる。



(a) スパコンプログラミング（1）および（I）



(b) 全学ゼミ：スパコンプログラミング研究ゼミ

図1 講義登録者数および単位取得者数の累計

図1 (a)から、工学部の講義においては登録者数の累計は561名、単位取得者数は195名に達している。

また図1 (b)から、教養学部講義については登録者数85名、単位取得者数37名に達している。

2016年度から片桐が名古屋大学へ移動となったため、図1が片桐による東京大学での講義による最終輩出人数となった。

## (2) 受講者の所属の累計

スパコンプログラミング(1)および(I)において、いままでアカウントを発行した学生の所属は、以下のとおりである(順不同)。

- 工学部
  - 産業機械、機械情報、機械、精密、電気電子、電子情報、計数、システム創成、社会基盤、航空宇宙、マテリアル工学科、物理工学
- 理学部
  - 天文学、地球惑星物理、化学、物理
- 薬学部
  - 薬学科
- 経済学部
  - 経済、金融
- 農学部
  - 生命化学・工学
- 法学部
  - 第3類
- 工学系研究科
  - システム創成、社会基盤、原子力国際、精密機械、物理工学、航空宇宙、機械情報、電気系、先端学際、応用化学、技術経営、金融、化学システム工学、精密、バイオエンジニアリング、機械、都市工学
- 情報理工学系研究科
  - コンピュータ科学、電子情報学、知能機械情報、数理、創造情報学
- 新領域創成科学研究科
  - 情報生命、先端エネルギー
- 理学系研究科
  - 地球惑星科学、天文学
- 農学生命科学
  - 応用生命
- 数理科学研究科
- 学際情報学府
  - 学際情報学
- 経済学研究科
  - 現代経済学、統計理論、金融システム、経済理論
- 医学研究科
  - 国保
- 総合文化科学研究科
  - 広域科学

以上から、本学の多種の学科から受講がなされている。本講義は、学際領域研究の支援になっているものと期待される。

### 3. MPI を用いた並列プログラミング教育

#### (1) 講義の方針

本講義を開講するに当たり、以下の指針を示している。

「高性能計算を学ぶためには、計算機アーキテクチャに始まり、コンパイラや OS といったシステムソフトウェア、さらに扱っているアプリケーションのアルゴリズムに至る広範な階層の知識が必要となる。講義でこれらすべてを扱うことはできない。そこで、厳選された実用的な課題について講義と演習を行う。本講義は、従来講義のように広い知識の獲得を目指すものではない。実際に高性能プログラムを基盤センターのスーパーコンピュータ上で開発できるという、実用的でかつ、研究者として生き残るために必須な技能の習得を目指すものである。この技能の習得により、受講者の研究を格段に進展させることを目標とする。」

MPI(Message Passing Interface)を用いた並列プログラミングにおいて、MPI の機能を網羅的に紹介する従来のテキストのような方針ではなく、センターユーザの多数を占める数値シミュレーション研究者に必要な最低限の実装知識と、センターのスパコンを利用するための最低限の技術の習得を目的にする。

#### (2) 並列プログラミング教育の方針

並列プログラミング教育における最も重要な概念は、SIMD ( Single Instruction Multiple Data stream ) の概念であるという仮定のもとに教材を作成している。SIMD とは、並列計算機の種類の一つである。図 2 のように、同一の命令 (たとえば、加算命令) がなされるが、加算する対象のデータは並列計算機の構成要素であるプロセッサ・エレメント (Processor Element, PE) で異なるというモデルである。

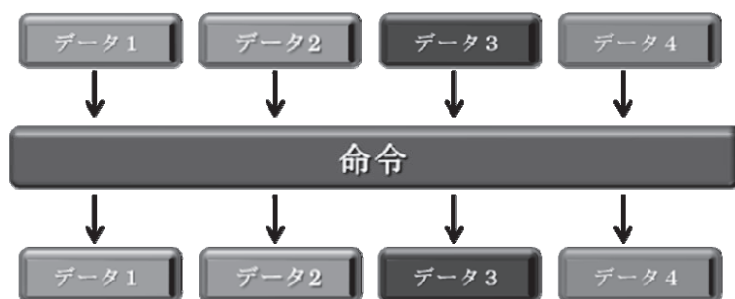


図 2 SIMD の概念

図2のSIMDの概念を、並列プログラミングの経験がない受講生に教えることは容易ではない。理由は、いままで扱ってきた逐次プログラムと受講生の頭にある「逐次」プログラミングモデルとの乖離があるからである。そこで、SIMD の概念が自然に身につくように、以下のような段階を経て並列化ができる方針を立てた。

- **段階1** 並列環境に慣れるため、簡単な並列プログラムを実行する。並列プログラムを眺める。
- **段階2** 逐次プログラムを実行する。逐次プログラムを解析する。
- **段階3** 逐次プログラムに存在するループに変更を施すだけで並列化ができる演習。
- **段階4** 逐次プログラムに存在するループに変更を施し、かつ単純な MPI 関数を記述することで並列化できる演習。
- **段階5** データ構造の変更、多数の MPI 関数を記述することで並列化できる演習。

並列化のための段階1から5を通じて、逐次プログラムから並列プログラムを作成できる「方法論」を習得するというのが、本講義の最終的な目的である。この方法論は一般的であり、特に、行列演算の並列化においては効果的である。この方法論を習得することで、ソフトウェア工学的にも、「よい並列化」の作法を身に付けさせる。

### (3) 内容

本講義で行った授業内容を表1に示す。この内容は初めて開講された2007年度夏学期以来、大幅な変更は無い。表1のように、本講義で用いたアプリケーションは、行列-ベクトル積、べき乗法(行列-ベクトル積が使われている固有値・固有ベクトルの初等的な数値計算法)、行列-行列積、LU分解法の4種である。

表1 授業内容

講義回数	内容概略
ガイダンス	初回ガイダンス、高性能計算の基礎
第1回講義	<b>並列数値処理の基本演算</b> : 性能評価指標、基礎的な MPI 関数、データ分散方式、ベクトルどうしの演算、ベクトル-行列積、リダクション演算、数値計算ライブラリについて
第2回講義	<b>スーパーコンピュータを利用しよう</b> : スパコンを利用しよう、並列プログラミングの基礎、二分木総和演算
第3回講義	<b>高性能プログラミングの基礎(1)</b> : 階層キャッシュメモリ、演算パイプライン、ループアンローリング、配列連続アクセス、キャッシュとキャッシュライン、キャッシュライン衝突、サンプルプログラムの実行、演習課題、レポート課題
第4回講義	<b>高性能プログラミングの基礎(2)</b> : ブロック化、その他の高速化技術、OpenMP 超入門、サンプルプログラム(OpenMP)の実行、演習課題、レポート課題
第5回講義	<b>行列-ベクトル積</b> : サンプルプログラム(行列-ベクトル積)の実行、並列化の注意点
第6回講義	<b>べき乗法</b> : べき乗法とは、サンプルプログラム(べき乗法)の実行、並列化の注意点
第7回講義	<b>行列-行列積(1)</b> : 行列-行列積とは、ループ交換法、ブロック化(タイリング)法、Cannonのアルゴリズム、Foxのアルゴリズム、SUMMA、PUMMA、Strassenのアルゴリズム、サンプルプログラム(行列-行列積(1): 簡単版)の実行、並列化の注意点

第8回講義	<b>行列-行列積(2)</b> :コンテスト課題発表、コンテストプログラムの実行、サンプルプログラム(行列-行列積(2):ちょっと難しい完全並列版)の実行、並列化の注意点、並列化のヒント
第9回講義	<b>LU 分解法(1)</b> :LU 分解法(ガウス・ジョルダン法、ガウス消去法、枢軸選択、LU 分解法(外積形式、内積形式、クラウト法、ブロック形式ガウス法、縦ブロックガウス法、前進・後退代入))、サンプルプログラム(LU 分解法)の実行、並列化のヒント、演習課題、レポート課題
第10回講義	<b>LU 分解法(2)</b> :LU 分解の逐次アルゴリズムの解説
第11回講義	<b>LU 分解法(3)</b> :レポート提出の注意、レポート課題採点基準、LU 分解の並列化のヒント(2)
第12回講義	<b>非同期通信</b> :1対1通信に関する MPI 用語、サンプルプログラム(非同期通信)の実行
第13回講義	<b>発展的課題</b> :ソフトウェア自動チューニング:背景、ソフトウェア自動チューニングとは、FIBER方式、自動チューニング記述言語ABCLibScript、ソフトウェアデモ、レポート課題

演習課題を与える一方、受講生が参加できる「プログラミングコンテスト」を講義の一環として開催した。コンテストの参加者、すなわちコンテストにおける出題をすべて解答する並列プログラムを提出した場合、レポートに加点を与えた。コンテストにおいて入賞(1位~3位)した場合、無条件で「優」を与えるという条件を付した。

本講義の演習のために、表2に示すサンプルプログラム9本を教材として開発している。このサンプルプログラムは、受講生が講義中にダウンロードして実行確認をした上、演習で用いる。C言語版と Fortran 言語版の2種を用意している。

表2 サンプルプログラム一覧

サンプルプログラム (並列化の段階)	サンプルプログラムの内容
#1. Samples-fx.tar (段階1、2)	並列版 Hello プログラム、並列円周率計算プログラム、逐次転送方式による並列総和演算プログラム、二分木通信方式による並列総和演算プログラム、時間計測方法の並列プログラム
#2. Mat-Mat-noopt-fx.tar (段階2)	行列-行列積の逐次プログラム(逐次チューニング用)
#3. Mat-Mat-openmp-fx.tar (段階2、3)	行列-行列積の逐次プログラム(OpenMP 並列化用)
#4. Mat-vec-fx.tar (段階2、3)	行列-ベクトル積の逐次プログラム
#5. PowM-fx.tar	べき乗法の逐次プログラム

(段階 3、4)	
#6. Mat-Mat-fx.tar (段階 3)	行列-行列積の逐次プログラム (お手軽並列化用)
#7. Mat-Mat-d-fx.tar (段階 3、4)	行列-行列積の逐次プログラム (完全分散並列化用)
#8. LU-fx.tar (段階 4、5)	LU 分解法による連立一次方程式の求解の逐次プログラム
#9. SP_Isend-fx.tar (段階 1、2)	非同期通信の並列プログラム

#### 4. おわりに

本講義の事前登録者 (工学部共通科目) は、2015 年度まで累算し 561 名にもものぼる。最終的な単位取得者数は、累算で 195 名である。本講義を継続していくことで、本センターのスーパーコンピュータが利用できる人材にとどまらず、学際領域分野に貢献できる多数の人材を輩出していると考えられる。学界にとどまらず、産業界にも通用する人材育成の達成が期待される。

東京大学においては、東京大学の研究教育活動として平成 28 年度 4 月に開始し、計算物理学などの計算科学・工学分野と、情報科学分野を連携・融合しながら東京大学の英知の結集を行い、世界の計算科学研究を先導することを目的とする「計算科学アライアンス」事業が発足している。詳しくは、以下のHPを参照されたい。

<http://www.compsci-alliance.jp/>

#### 参 考 文 献

- [1] 中島研吾、究極の「並列プログラミング教育」を目指して—地球惑星科学専攻での 4 年間と未来への提言—、スーパーコンピューティングニュース、Vol. 11, No. 4, pp. 30-44, 2009 年 7 月.
- [2] 東京大学 学際計算科学・工学人材育成プログラム.  
<http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/CSEedu/>
- [3] 東京大学情報基盤センタースーパーコンピューティング系 教育利用.  
<http://www.cc.u-tokyo.ac.jp/service/education/>
- [4] 片桐孝洋：東京大学のスーパーコンピュータを用いた並列プログラミング教育—工学部・工学系研究科共通科目「スパコンプログラミング 1 および I」(2014 年度 夏学期)、および、全学ゼミ「スパコンプログラミング研究ゼミ」(2014 年度冬学期)を通じて、スーパーコンピューティングニュース、Vol. 17, No. 3, 2015 年 5 月.