

科学技術計算Ⅱ／コンピュータ科学特別講義Ⅱ／ハイブリッド分散並列コンピューティング：「並列有限要素法入門」（オンライン）

中島 研吾

東京大学情報基盤センター

本稿では、2021年度冬学期に実施した、科学技術計算Ⅱ（大学院情報理工学系研究科数理情報学専攻）／コンピュータ科学アライアンス特別講義Ⅱ（同 コンピュータ科学専攻）／ハイブリッド分散並列コンピューティング（大学院工学系研究科電気系工学専攻）「並列有限要素法入門」¹について紹介する。「新型コロナウイルス感染症」のため、前年度に引き続き、全ての講義を Zoom によるオンラインで実施した。

2014年度までは、夏学期、冬学期に、科学技術計算Ⅰ・Ⅱ／コンピュータ科学特別講義Ⅰ・Ⅱ「科学技術計算プログラミング（有限要素法）」²を実施してきた。偏微分方程式の数値解法として、様々な科学技術分野のシミュレーションに使用されている有限要素法（Finite-Element Method, FEM）について、背景となる基礎的な理論から、実用的なプログラムの作成法まで、連立一次方程式解法などの周辺技術も含めて講義を実施し、プログラミングの実習を実施してきた。題材としては一次元及び三次元弾性静力学を扱い、プログラミング言語としてはC言語を使用していた。夏学期（Ⅰ）と冬学期（Ⅱ）に分けて、夏学期は有限要素法の理論とプログラミングの基礎、冬学期はその並列化についての講義・実習を行い、冬学期は東大情報基盤センターのスーパーコンピュータを使った実習を実施してきた。2011年度までは T2K 東大を使用していたが、2012年度からは Fujitsu PRIMEHPC FX10（Oakleaf-FX, 2012年4月運用開始）、2016年度からは「データ解析・シミュレーション融合スーパーコンピュータシステム（Reedbush）」³のうち、汎用CPU（Intel Broadwell/EP）のみから構成される Reedbush-U（2016年7月運用開始）を使用してプログラミング実習を実施してきた。更に、2019年度冬学期からは、「大規模超並列スーパーコンピュータシステム（Oakbridge-CX, OBCX）」⁴を使用している。OBCXは2019年7月に運用を開始し、各々2基の Intel Xeon Platinum 8280 から構成される計算ノードを1,368ノード搭載している。

2014年度までの講義では、冬学期（Ⅱ）の履修は夏学期（Ⅰ）の履修を前提としていたが、昨今の大学の国際化に伴い、10月に入学する留学生が増加しており、そのような条件を満たさない履修者が増えてきた。そこで2015年度からは、方針を変更し、両者のある程度独立した科目として履修できるよう：

- 夏学期（Ⅰ）：計算ノード内のマルチスレッド並列化に関する内容⁵
- 冬学期（Ⅱ）：分散並列環境における並列化に関する内容

¹ <http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/21w/>

² <http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/14s/>, <http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/14w/>

³ <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/reedbush/service/>

⁴ <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/obcx/service/>

⁵ <http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/21s/>

のように実施することとした。留学生の受講，国際化に配慮して英語版教材のみを提供するとともに，**2017年度からは英語で講義を実施している。**

表1に講義日程と内容を示す。上記のように，様々な分野で広く利用されている有限要素法を題材とし，一次元・三次元定常熱伝導方程式を扱った。一次元・三次元有限要素法，MPI（Message Passing Interface）による並列プログラミング，並列要素法の順番で講義・演習を実施した。また，ハイブリッド並列プログラミングモデルの重要性を考慮して，MPI+OpenMPハイブリッド並列プログラミングに関する講義・演習を実施した。MPIによる並列有限要素法のプログラムの各プロセスにOpenMPを適用して並列化を実施した。

登録者は35名（うち17名が留学生），オンラインということもあり常時出席者は25名程度，単位を取得したのは19名（留学生11名）であった。2020年度は登録者36名，単位取得者12名であったのに比べると，単位取得者の割合は増加している。

表1：講義日程，内容

| | Date | Time | Title |
|-----------|-------------------|------------------|--|
| 1 | Oct.06(W) | 0830-1015 | Introduction, Introduction to FEM (1/2) |
| 2 | Oct.13(W) | 0830-1015 | Introduction to FEM (2/2), 1D/3D FEM (1/4) |
| 3 | Oct.20(W) | 0830-1015 | 1D/3D FEM (2/4) |
| 4 | Oct.27(W) | 0830-1015 | 1D/3D FEM (3/4) |
| 5 | Nov.03 (W) | 0900-1015 | 1D/3D FEM (4/4) |
| 6 | Nov.10 (W) | 0830-1015 | Introduction to Parallel FEM, Login to OBCX, MPI (1/5) |
| 7 | Nov.17 (W) | 0830-1015 | MPI (2/5) |
| 8 | Nov.24 (W) | 0830-1015 | MPI (3/5) |
| 9 | Dec.01 (W) | 0830-1015 | Report S1, MPI (4/5) |
| 10 | Dec.08 (W) | 0830-1015 | MPI (5/5) |
| 11 | Dec.15 (W) | 0830-1015 | Report S2, Parallel FEM (1/4) |
| 12 | Dec.22 (W) | 0830-1015 | Parallel FEM (2/4) |
| 13 | Jan.05 (W) | 0830-1015 | Parallel FEM (3/4) |
| | Jan.12 (W) | | (No Class) |
| 14 | Jan.17 (M) | 0830-1015 | Parallel FEM (4/4), Hybrid OpenMP/MPI (2/3) |
| 15 | Jan.19 (W) | 0830-1015 | Hybrid OpenMP/MPI (2/3) |
| 16 | Jan.26 (W) | 0830-1015 | Hybrid OpenMP/MPI (3/3) |