

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、2022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）」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）、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）」を使用してプログラミング実習を実施してきた。本年度からは、「『計算・データ・学習』融合スーパーコンピュータシステム（Wisteria/BDEC-01）」³のうち、シミュレーションノード群（Odyssey）を使用している。

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、両者が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⁴
- 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/22w/>

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/wisteria/service/>

⁴ <http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/22s/>

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。11月16日の講義は海外出張中(アメリカ)で，講義時間に会議が開催されていたため，ビデオ録画しておいた講義を聴講してもらった。

表2は，オンラインとなった2020年度以降の受講者数，単位取得者数の推移である。

表1：講義日程，内容

	Date	Time	Title
1	Oct.05(W)	0830-1015	Introduction, Introduction to FEM (1/2)
2	Oct.12(W)	0830-1015	Introduction to FEM (2/2), 1D/3D FEM (1/4)
3	Oct.19(W)	0830-1015	1D/3D FEM (2/4)
4	Oct.26(W)	0830-1015	1D/3D FEM (3/4)
5	Nov.02 (W)	0900-1015	1D/3D FEM (4/4)
6	Nov.09 (W)	0830-1015	Introduction to Parallel FEM, Login to Odyssey, MPI (1/5)
7	Nov.16 (W)	0830-1015	MPI (2/5) (Video Recorded)
	Nov.23 (W)		National Holiday (No Class)
8	Nov.30 (W)	0830-1015	MPI (3/5)
9	Dec.07 (W)	0830-1015	Report S1, MPI (4/5)
10	Dec.14 (W)	0830-1015	MPI (5/5)
11	Dec.21 (W)	0830-1015	Report S2, Parallel FEM (1/4)
12	Jan.04 (W)	0830-1015	Parallel FEM (2/4)
13	Jan.11 (W)	0830-1015	Parallel FEM (3/4)
14	Jan.18 (M)	0830-1015	Parallel FEM (4/4), Hybrid OpenMP/MPI (1/2)
15	Jan.25 (W)	0830-1015	Hybrid OpenMP/MPI (2/2)
16	Feb.01 (W)	0830-1015	Q/A

表2：受講者・単位取得者数の推移

	受講者数 (うち留学生)	単位取得者数 (うち留学生)
2020年度	36 (19)	12 (7)
2021年度	35 (17)	19 (11)
2022年度	51 (22)	14 (10)