

## 第55回炉物理夏期セミナー開催報告

セミナー小委員会担当幹事  
名古屋大学 遠藤知弘  
山本章夫

第55回炉物理夏期セミナーは、2024年9月24日(火)～26日(木)の日程で、名古屋大学東山キャンパスES総合館にて開催された。名大が前回担当したのは2004年であり、高山で行われた。(前々回は1984年に御岳休暇村)。参加者は50名(社会人26名、学生24名)であり、学生が約半数というある意味、理想的な参加者構成となった。

テーマは「Reduced Order Model：基礎理解から炉物理への応用」であり、固有直交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)を中核として、炉物理計算を効率的に行うReduced Order Modelを理解し、自分で実装するための知識を身につけることを目的とした。そのため、Google Colaboratoryやグループワークによる演習など、講義を聴くだけでなく演習も交えたスタイルとした。詳細は次ページ以降に示す。

また、炉物理夏期セミナーは保養地などで宿泊しつつ行う形態が伝統的であるが、炉物理に係わる人材が減少する中、効率的にセミナーの開催を行うことを考慮して、ロジ的に以下の形で開催することにした。アンケート結果を見ると、方向性は支持されているようである。

○宿泊は参加者が各自で確保する

- ・ドタキャンのリスク低減
- ・最低開催人数を最小限にする(参加者にかかわらず赤字にならない構造とする)
- ・事務局の負担軽減

○参加費を無料にする

- ・予算管理に係わる労力の削減
- ・原子力学会事務局との複雑なやりとりを避ける
- ・企業への協賛金の依頼の労力を削減する
- ・テキストは印刷せず、ペーパーレス(ダウンロード)とする

○懇親会はセミナーの公式行事とせず有志参加とする

- ・夏期セミナーの公式行事とすると予算管理が必要になるため

○名古屋大学を主催として、炉物理部会を共催にする

- ・講義室を無料で使用するため

これらの工夫により、夏期セミナーの事務局は主として企画立案及びセミナーの教材準備に集中することが出来、ロジ的な負荷は8割減といったところになったと思われる。従来の「保養地で開催」も良さがあるため、どのような開催形態にするかは来年度以降に担当する事務局が選ぶと良いと思う。

最後に、講義をお引き受けいただいた講師の皆様、参加いただいた皆様に深く御礼申し上げます。

### 1. セミナー概要

テーマ：Reduced Order Model：基礎理解から炉物理への応用

会期：2024年9月24日(火)～26日(木)

会場：名古屋大学 ES総合館(東山キャンパス) 1F会議室

主催：名古屋大学

共催：原子力学会炉物理部会

参加者：50名（社会人26名[講師4名含む]、学生24名）

### 2. 参加費・宿泊費

参加費：無料

テキスト代：無料

宿泊費：各自で負担

昼食代：各自で負担

懇親会費：各自で負担

### 3. プログラム

1日目: 9/24 (火)

- 12:30 : 受付開始
- 13:00～13:15 : 開会挨拶、連絡事項
- 13:30～17:00 : 講義「ROMで捉える炉物理」、  
演習「Google Colaboratoryを用いたPOD演習」(名大 遠藤 知弘)
- 18:00～ : 有志で懇親会

2日目: 9/25 (水)

- 9:00～11:00 : 講義「空間依存動特性計算に関するROM」(NEL 辻田 浩介)
- 11:00～12:00 : 演習「Ikaros3D実演」(名大 遠藤 知弘)  
※リアルタイム炉心シミュレータIkaros3D:  
<https://www.fermi.energy.nagoya-u.ac.jp/Ikaros3D.html>
- 13:00～17:00 : 講義・演習「核種生成・変換計算に関するROM」(北大 千葉 豪)
- 17:00～ : 集合写真撮影

3日目: 9/26 (木)

- 9:00～10:20 : 講義「RSE法による共鳴計算、核定数テーブルの圧縮」(MHI 山本 真人)
- 10:30～12:00 : 若手研究会
- 12:00～12:15 : 閉会挨拶、解散

#### 4.各講義の概要

講義「ROMで捉える炉物理」、演習「Google Colaboratoryを用いたPOD演習」(名大 遠藤 知弘)

そもそもROMが何か、なぜROMを使用するのかという基礎的な解説からスタートし、ROMの一例として、固有直交分解(POD)について説明を行った。PODの適用にあたっては、入力条件を様々に変更した計算を実施し、その結果を行列形式に整理する。この行列に特異値分解を適用することで、計算結果を再現する直交基底を作成する。直交基底に対応する特異値は、解を再現するにあたってそれぞれの直交基底がどの程度重要であるかを定量的に示している。

この考え方をマスターするため、Google Colaboratoryを用いて次元拡散方程式の解を対象として演習を行った。

講義「空間依存動特性計算に関するROM」(NEL 辻田 浩介)

PODを空間動特性方程式に適用するための方法論について紹介があった。解くべき問題を粗タイムステップをもちいるなどの粗い離散化条件で計算しておき、その結果(中性子束分布など)を用いて直交基底を作成する。この直交基底を用いて、空間離散化した拡散方程式の反復行列を圧縮し、高速な計算を実施する。直交基底の準備にあたっては、それぞれの物理的な特性にあった直交基底を準備することが重要である。

演習「Ikaros3D実演」(名大 遠藤 知弘)

PODを用いたシミュレータIkaros3Dを用いて、UTR-KINKIを模擬した仮想的な二分割炉心に対して、制御棒落下法による制御棒価値測定の実演を実施した。結果を処理するスプレッドシートを参加者全員で共有し結果を処理することで、PODを用いたシミュレータによって空間依存動特性性が考慮できることを確認した。

講義・演習「核種生成・変換計算に関するROM」(北大 千葉 豪)

線形回帰とPODに関する基礎の講義と演習からスタートして、PODを核種の燃焼計算に適用する場合の方法論と結果について説明があった。詳細な燃焼チェーンを用いる場合、1400核種程度を扱う必要があるが、低ランク近似により自由度を100程度まで圧縮出来る。ただし、基底を作成する際に小さな原子数密度の核種について、スケールリング(値域を合わせる)しないと圧縮後の燃焼行列の固有値が正になり、燃焼計算の時間積分が発散する可能性が生じるとの説明があった。

講義「RSE法による共鳴計算、核定数テーブルの圧縮」(MHI 山本 真人)

実機核特性解析で用いられているPODの例として、共鳴計算手法であるRSE法及び炉心計算に用いられる多群微視的/巨視的断面積の圧縮について紹介があった。微視的断面積については、原子数密度と中性子束を重みとして考慮することで、圧縮率99.7%と大幅な圧縮が可能となる。またRSE法については、超多群スペクトルをPODで展開して、展開係数に対する中性子輸送方程式を解き、その結果から非均質体系における超多群スペクトルを再構成する。領域間で物質が異なり、共鳴干渉が生じる状況でも精度良く計算可能であることが紹介された。

## 5.若手研究会

9月26日(木) 10:30~12:00 :

2名の参加者から、自身の研究に関連する発表があった。各発表のタイトルと発表者は次のとおり。

### (1) 機械学習とゲーム理論を用いた燃料配置の最適化(名大 笠間 陸斗)

DNNなどの機械学習を用いて自動的に燃料配置を作成する研究について紹介があった。燃料配置の最適化は、SAやGAなど、モンテカルロ探索を含むメタヒューリスティック法で行われてきたが、この研究では燃料の装荷手順そのものを機械学習し、燃料配置の最適化を燃料装荷手順の最適化と定義し直すことで燃料配置の自動作成を行う。この考え方は、碁や将棋などのゲームAIのアプローチを踏襲したものであり、最近の技術開発の成果を活かすことが出来る。最近のAI技術の進展を反映した講演であった。

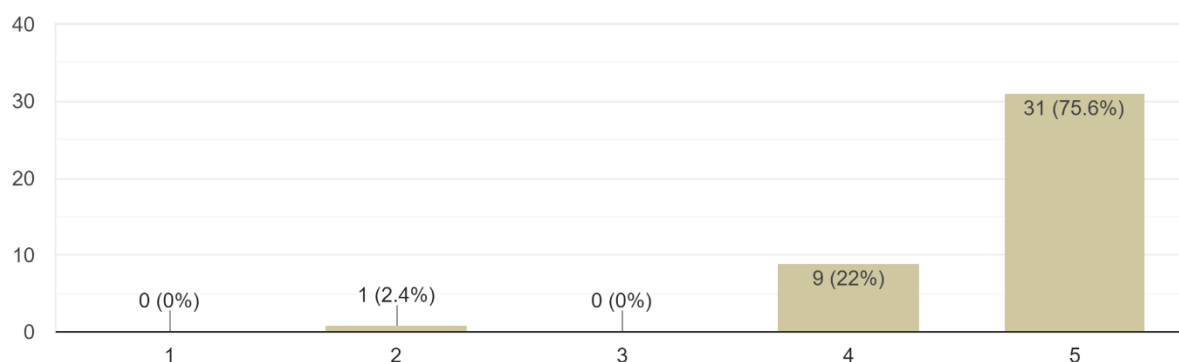
### (2) 過去の未解明臨界事故を対象とするCFD及びMC計算(JAEA 福田 航大)

Windscaleで発生した水溶液系における臨界事故について、CFDで計算した有機溶媒と水溶液の空間分布が実効増倍率に与える影響を六因子公式によって分析した。容器からの高速中性子の漏れと $\eta$ 値の変動が実効増倍率に与える影響が大きいことが分かった。一見、直感に反する結果についても、六因子公式で反応度の成分分析を行うことでその理由を概ね説明することが出来た。学生向けに時々炉物理クイズを交えながらの講演であり、教育効果は高かったと思われる。

## 6.アンケート結果

セミナー全体に関する満足度をお聞かせください。

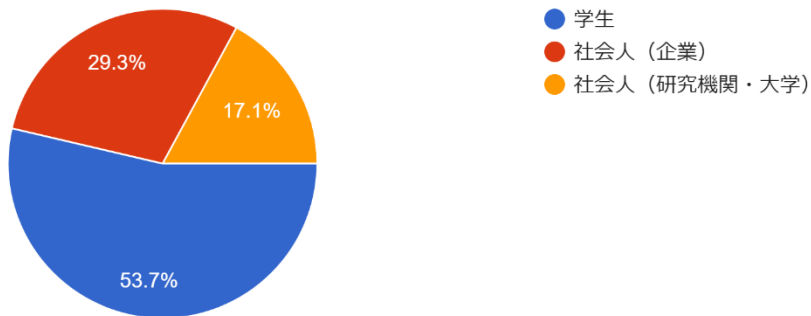
41件の回答



不満 0 ⇔ 5 満足

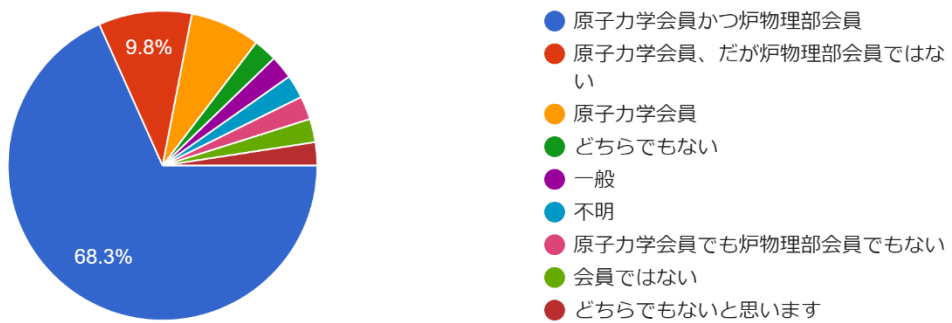
あなたについて教えてください

41件の回答



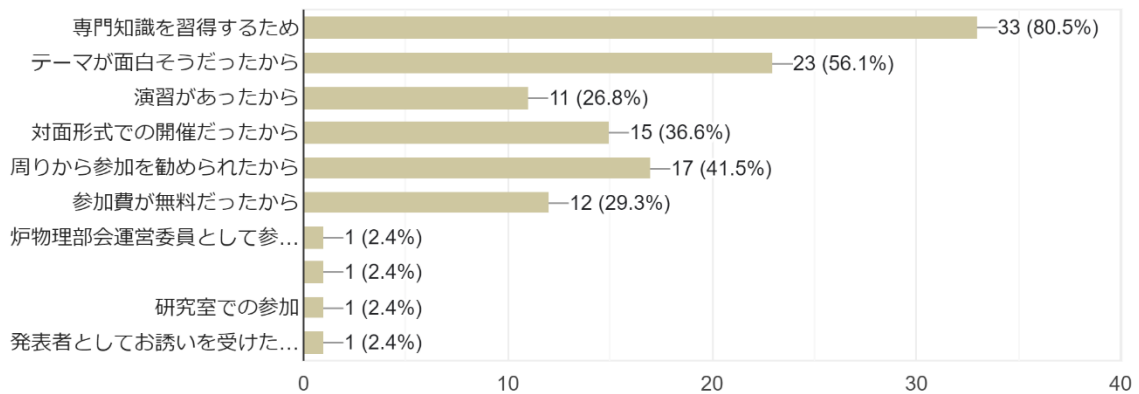
原子力学会会員、炉物理部会員ですか？

41件の回答



今回のセミナーを受講するきっかけは？ (該当するものは全て)

41件の回答



**講義・演習・若手研究会発表で、最も役立った・面白かった内容は何ですか？**

- ・ POD 基底における特異値分解の意味について。
- ・ グーグルコロボを利用した POD 基底の説明がとても役立ちました。
- ・ 演習で実際に低次元化の過程を追いつつ、具体的な計算と図示ができ、理解に有益だった。
- ・ AI を活用したプログラミング演習。
- ・ 固有直交分解の説明が分かりやすくそれまでの講義と繋がった。
- ・ 低次元化行列の固有値が保存していないことで解の不安定性が生じること。
- ・ グループワーク、線形代数小テスト。
- ・ 空間依存動特性計算に関する ROM。
- ・ ROM の問題の複雑さの話。
- ・ 手品による ROM 説明は非常に面白かったです。
- ・ 燃料配置の最適化。
- ・ 臨界事故解析。核・流体の結合計算結果により、6 因子で  $k_{eff}$  変動の解釈は分かりやすい、大変勉強になりました。

**講義・演習・若手研究会発表で、難しかった・改善が必要な内容は何ですか？**

- ・ 内容は全体的に難しかった。
- ・ 理論式の解説について。数式が難しかった
- ・ いずれの講義も中性子などの絡む方程式を展開する過程は難解だった。
- ・ 輸送計算を理解できていないためその関連の話の理解が難しかった。
- ・ 空間依存動特性計算/動特性方程式を理解するのが難しかったです。
- ・ Cs137 の重量計算。線形代数小テストの答えが欲しかった。
- ・ 共鳴計算、RSE 法。
- ・ 若手研究会は折角の機会なので、発言者が固定されることが無いよう、若手同士が活発にコミュニケーションをとり、親睦を深めつつ炉物理研究への理解を深めることができるような場とできるような工夫が必要。

**セミナー・懇親会全般に関して、気づいた点や改善すべき点があればお聞かせください。**

- ・ 主催側の負担を考えると、今回のように宿泊は各自確保で良いと思う。
- ・ 主催・共催大学の講義室をお借りして開催できるのは、会場手配の準備や費用の観点から魅力的に感じました。
- ・ 名札があったらあまり話したことの無い社会人の方とも話しやすかった気がします。

**今後の夏期セミナーで学びたい内容・テーマは何ですか？**

- ・ 新型炉、次世代炉、革新炉、ガス炉、マイクロ炉。将来炉開発について。
- ・ 核熱構造カップリングの基礎から応用まで
- ・ 機械学習の炉物理への適用
- ・ データ同化
- ・ 並列化手法
- ・ Google コラボを用いた演習など実際に手を動かして取り組む内容が今後も学びたいと感じました
- ・ 炉物理向けプログラミング。実際に計算コードを作る演習。
- ・ 実機炉心解析に関する最新の理論・技術等
- ・ 輸送計算手法、輸送方程式 MOC
- ・ 共鳴計算
- ・ 燃焼計算の基礎及び実機での取扱い、崩壊熱及び核種組成解析
- ・ TSL データについて
- ・ 未臨界度測定
- ・ これから炉物理の世界で生きていくためには何を勉強すればよいか、を勉強したい

その他感想、ご意見などがございましたら、ご自由に記述ください。

- ・ 初日は午後から、最終日は午前までという日程は移動時間を考慮すると非常にありがたかったです。
- ・ 最新の炉物理分野で使われる概念を理解することができ、役に立ちそうだと感じた。
- ・ 原子炉物理における多くの分野で ROM が使用されており、今後も発展していくと良いと感じた。
- ・ 最新の炉物理分野で使われる概念を理解することができ、役に立ちそうだと感じた。
- ・ ROM を中心とした内容で、大変有意義でした。
- ・ 独学で ROM を勉強していたものの理解が及ばないところがあったので、非常に勉強になりました。ありがとうございました。
- ・ POD について、研究に取り入れたいと感じた。
- ・ POD 等について受講前よりもわかるようになり、他大学の学生とも仲良くなれて有意義でした。



集合写真



Google Colaboratoryを用いたPOD演習風景