

## 11. 超伝導分科会企画シンポジウム

### 「超伝導材料を舞台に活躍する数値シミュレーション技術 ～物理現象、結晶成長、そしてアプリケーション設計まで～」報告

パーソナルコンピュータの性能がこの数十年で急速に向上し、ひと昔前では大型計算機でしか成し得なかった複雑な計算を手元でできるようになり、いろんな分野で計算機科学が大きな威力を発揮している。超伝導材料も例外ではなく、量子化磁束線とピン止め中心の相互作用などの物理現象から多元素材料である高温超伝導体の結晶成長メカニズムの理解、そして、



シンポジウムの様子

応用機器の設計まで、広い分野で利用されている。また、応用物理学会でも 2015 年度より新領域グループ「量子化磁束動力学シミュレーション研究グループ」が設立され、活発な議論が行われている。そのような状況の中、超伝導材料に関する数値シミュレーションについての現在の状況を一望する目的で、超伝導分科会と上記新領域グループの共同企画にて本シンポジウムが開催された。会場には、超伝導以外の分野の数値シミュレーションに取り組んでいる研究者も含め常時 60-70 名の参加があり、活発な議論も行われた。

シンポジウムでは最初に馬渡康徳氏（産総研）より、「超伝導シミュレーションの概要～基礎から応用まで～」と題するイントロダクトリートークがあり、応用物理分野でのシミュレーションの歴史の紹介の後、超伝導について対象分野を現象の「長さスケール」で「マイクロ／メゾ／マクロスケール」および複数のスケールにまたがる「マルチスケール」の 4 種に分類し、それぞれどういった研究がなされてきたか、その有効性と課題などをわかりやすく解説した。

続いて、海外からの招待講演者である Mark D Ainslie 氏（ケンブリッジ大）は「Modelling of Bulk Superconductor Magnetisation: A Review」という題で、超伝導バルクの着磁プロセスにおける熱および電磁現象について、実験結果と計算結果を比較しながら、そのメカニズムに対する考察を紹介するとともに、それに基づいた、捕捉磁場を高めるための有効な着磁プロセスやバルク形状・配置についての提案を行った。

石山敦士氏（早大先進理工）は、「医療用 MRI および加速器のための高温超伝導コイルシステムの特性評価と設計」という題で、氏が現在関わっている 9.4T 全身用 MRI および癌治療用加速器（スケルトン・サイクロトロン）開発プロジェクトにおいて、高機械強度・高電流密度・高熱的安定・高磁場・高精度磁場（5-High）を可能とするコイル化基盤技術開発の枠組みの中で行っている数値解析の紹介を行った。中でも高精度磁場のためには、誘導遮蔽電流により発生磁場の影響が深刻であり、その解析のために三次元非線形過渡電磁場解析プログラムの開発を行い、計算により、コイル素線の細線化、層間絶縁、励磁電流パターンの影響などを検討し、最適化設計にフィードバックしているとのことである。

前半最後の講演は加藤勝氏（大阪府大工）らで、「超伝導シミュレーション：マイクロからマクロ

へ」と題し、超伝導状態を形成する電子そのものを扱った微視的なシミュレーション例として、ナノ構造超伝導体の超伝導転移の温度サイズ依存性と不純物効果について、Bogoliubov-de Gennes 方程式や Gor'kov 方程式を用いた計算例を紹介し、超伝導体サイズが小さくなるほど転移温度が上昇し、さらに条件により不純物があると転移温度が上昇することを述べた。一方、もう少しサイズの大きな量子化磁束の運動等では、Ginzburg-Landau 方程式や分子動力学法 (MD) などによって記述する。MD 法によりナノ構造超伝導体の渦糸格子の融解現象を調べた結果について紹介し、BSCCO ナノ構造体での実験で報告されている磁束融解線の振動現象が計算でも得られていることを述べた。講演では、計算で得られた磁束線の運動の動画等も紹介され、そのような現象がどのような磁束線の運動と関連しているのか、具体的なイメージをつかむことができるのがシミュレーションの醍醐味であると実感した。

途中休憩を挟んだ後半最初は、松野哲也氏 (有明高専) が「量子渦ダイナミクスのための幾何学的数値積分」と題する、超伝導体中の磁束量子のダイナミクスを、時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式に基づいて数値シミュレーションした結果に関する講演があった。symplectic 積分と呼ばれる手法を用いた、ゲージ場中の量子拡散方程式を数値計算するスキームを構成し、磁束量子のサイト間の移動の様子が動的に解析された。シミュレーション結果の一部は YouTube にもアップロードされており、超伝導体内部で磁束が拡散する様子が鮮やかな 3D 動画として見ることができる。

続いて、浅井栄大氏 (産総研) は「高温超伝導体テラヘルツ発振器の高性能化に向けた電磁界シミュレーション」と題する講演を行った。銅酸化物超伝導体の固有接合内で発生するジョセフソンプラズマ振動を利用した、テラヘルツ波発振器の研究が精力的に行われているが、実用化にはさらなる出力の向上が必要である。浅井氏らは電磁場と固有接合の位相差を同時に扱う時間領域差分法を用いてシミュレーションにより、メサ構造内部の温度不均一によりテラヘルツ波強度が増加することや円偏光テラヘルツ波の発生が可能であることを示した。

一野祐亮氏 (名古屋大) は「REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 線材における自己組織化ピンニングセンター～薄膜結晶成長シミュレーション～」と題する講演において、REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO, RE=Y, Sm, Gd など) 薄膜の成長時に、添加された BaMO<sub>3</sub> (BMO, M=Zr, Sn, Hf など) が膜内に形成する多様なナノ構造を再現するシミュレーションコードの開発に成功した。このような自己組織化ナノ構造は、超伝導体の磁場-電流特性に大きく影響を与えるため、本手法は超伝導成長条件の最適化などに有用であると考えられる。

最後に、一般講演として吉原敬貴氏 (九州工大) が「時間依存 Ginzburg-Landau 方程式を用いた様々な形状を持つピンにおける超伝導体内の磁束線運動の解析」と題する講演を行った。3次元 TDGL 方程式を用いて、超伝導体内部において様々な形状や配置のピン (磁束を留める常伝導部分) が量子化磁束線に与える影響を検証し、面状ピンのピン止め効果が高いという結果が得られた。

以上、講演会場がやや手狭だったこともあるが、常時 60-70 名の参加で座席がほぼ満席となるほどの盛況となり、数値計算やシミュレーション技術への関心の高さが伺えた。最後に、快くお引き受けいただいた招待講演者の先生方、および最先端の研究成果をご講演いただいた一般講演者やお忙しい中ご参加いただいた多くの方々に厚く御礼申し上げます。

(中部大学・筑本知子、大阪大学・川山巖)