

## 結果報告書

### Tonomura FIRST International Workshop on “Challenges to New Developments in Electron Microscopy”

7つのパネルセッションとセッションコーディネータによるまとめ(Wrap-up)を行った。  
セッションの内容とコーディネータ、パネリストは以下の通り。

#### Session 1 “Can we detect electron phase shifts as precisely as 1/1000 of the electron wavelength?”

(千分の一波長で見る「高精度電子線計測」は可能か?)

微細な磁場や電場は物理学上の興味深い研究対象であると同時に、これを使いこなすことで先端技術開発を進めることができる。電子線ホログラフィーはこれを可能にする手段であり、そのためには現在よりも一桁高い 1/1000 波長の位相分解能が必要になる。電子線ホログラフィーで世界的権威の一人であるドレスデン工科大学のハネス・リヒテ教授をコーディネータに迎えて、方策を議論した。

リヒテ教授は電子線ホログラフィーの可能性についての概論を報告した。1/1000 波長の位相分解能については、ドゥーニン・ボルコフスキー教授が最適化条件について、フォルクル博士は達成条件について議論した。丹司教授は高位相分解能での観測結果における S/N 比の向上策について報告した。

1. Hannes **Lichte** (Tech. Univ. Dresden) (Coordinator)
2. Rafal E. **Dunin-Borkowski** (Technical Univ. of Denmark)
3. Edgar **Voelkl** (FEI)
4. Takayoshi **Tanji** (Nagoya Univ.)

#### Session 2 “Cutting edges of electron holography “

(電子線ホログラフィーの最先端)

電子線ホログラフィーは物質内の電場や磁場を可視化できるユニークな手段であり、これまで強磁性・強誘電性物質や超伝導体の電場・磁場特性の計測に広く使われてきた。電子線ホログラフィーを用いた微小磁性特性計測の権威である東北大学の進藤大輔教授をコーディネータに迎えて、電子線ホログラフィーの最先端技術の現状と将来動向について議論した。

進藤教授は電子線ホログラフィーを用いた微小電磁場の観測と解析の進展について述べた。続けて、マッカートニー教授はナノ領域における電磁場のイメージング、特に量子ドットおよびナノマグネットの周辺での電磁場の定量化について議論した。平山博士はリチウムイオン電池内でのリチウムの振る舞いをホログラフィーで観測した結果を報告した。村上教授は強磁性メモリの磁場ドメイン構造の解析結果を議論し、松井博士は FeCoSi 系のスカーミオンの磁場振る舞いの可視化について報告した。

5. Daisuke **Shindo** (Tohoku Univ.) (Coordinator)
6. Molly R. **McCartney** (Arizona State Univ.)
7. Tsukasa **Hirayama** (Japan Fine Ceramics Center)

8. Yoshikazu **Murakami** (Tohoku Univ.)
9. Yoshio **Matsui** (National Institute for Materials Science)

### Session 3 “New applications of electron microscopy and holography”

(電子顕微鏡および電子線ホログラフィーの新しい応用)

世界最高性能の電子顕微鏡および観測技術の完成により、3次元観測技術、損失の少ない量子測定法などを含む多くの新しい分野で応用が期待される。世界電子顕微鏡学会の会長であるフランス CNRS のクリスチャン・コリエックス教授をコーディネータに迎えて、様々な議論を行い、新しい応用を提案してもらった。

コリエックス教授は非弾性電子によるナノ表面における電場のマッピングについて報告した。ヤニック教授は非侵襲電子顕微鏡を用いた相互作用のない量子計測の可能性について議論した。森教授は阪大の300万ボルトの電子顕微鏡の応用について報告し、ヴァン・タンデルー教授は軌道角運動量を持つ電子(電子ボルテックスビーム)を用いた原子レベルでの新しい実験の可能性を議論した。ザルゼック博士は電子・光学分光法を用いたナノ材料の電子ダイナミックスの可能性を議論し、ハウイー教授は電子顕微鏡を用いた新しい応用研究分野を提案した。

10. Christian **Colliex** (CNRS) (Coordinator)
11. Mehmet F. **Yanik** (Massachusetts Institute of Technology)
12. Hirotaro **Mori** (Osaka Univ.)
13. Gustaaf **Van Tendeloo** (Univ. of Antwerp)
14. Nestor J. **Zaluzec** (Argonne National Laboratory)
15. Archie **Howie** (University of Cambridge)

### Session 4 “What can we observe at sub-Angstrom resolution and how far can we increase the point resolution?”

(サブオングストロームを切る高分解能で何が測定できるか?どこまで点分解能を上げることができるか?)

電子顕微鏡は小さなモノを拡大してみせる装置である。収差補正技術の開発により、原子半径の半分である0.5Åの分解能が達成された。電子顕微鏡が量子力学の世界を可視化し、さらなる高分解能を可能にするためには、新たな壁を越えなければならない。永く超高分解能電子顕微鏡の世界を牽引してきたアリゾナ州立大学のディビッド・スミス教授をコーディネータに迎えて方策を議論した。

スミス教授は、電子顕微鏡・試料・環境を考慮して、どこまで電子顕微鏡が使えるか、何が問題になるかなどについての詳細に報告した。高柳教授は、水素原子や陽子の観測・画像化の研究状況について議論し、末永博士は低電圧電子顕微鏡を用いた軽い原子一個の計測結果を報告した。収差補正技術の現状については、近藤博士が色収差補正について、稲田博士が収差補正した電子顕微鏡での二次電子による原子レベル分解能計測について議論した。収差補正技術の開発者であるローズ教授は、ドイツのSALVE計画での低電圧電子顕微鏡による原子レベル観測の可能性について議論し、ローズ教授とともに収差補正技術を開発したハイダー博士は新しい1.2MV電子顕微鏡の球面収差補正器の開発について報告した。

16. David J. **Smith** (Arizona State Univ.) (Coordinator)

17. Kunio **Takayanagi** (Tokyo Institute of Technology)
18. Kazutomo **Suenaga** (AIST)
19. Yukihiro **Kondo** (JEOL)
20. Hiromi **Inada** (Hitachi High-Technologies)
21. Harald **Rose** (Tech. Univ. Darmstadt)
22. Maximilian **Haider** (CEOS)

## Session 5 “Can we observe atom shapes and atom bonding? - in relation to electron diffraction -”

(原子構造、原子結合は見えるか？ 電子回折との関連において)

いままでの研究では原子を丸いものとして近似していたが、現実には合わなくなっており、正しい原子の姿をとらえることが重要になってきている。これを可能にし、原子を直視できるのは電子顕微鏡だけであり、高技術化が必要となる。超高分解能電子顕微鏡の世界的権威であるアリゾナ州立大学のジョン・スペンス教授をコーディネータに迎えて、原子の真の姿や原子間結合電子の観察実現に向けた議論を行った。

スペンス教授は、原子の回りの電子状態の小さな変化が原子の特徴・性質に大きな変化を与えることから、原子を直視する技術開発の重要性を議論した。ズー博士は原子の非球形電子軌道の電子顕微鏡で測定する技術と結果について報告した。ヴァン・タンデルー教授は歳差運動を利用した回折技術を使用した材料研究について議論し、ハウイー教授は固体中の原子結合状態の観測に向けて問題となる項目を指摘し、改善策を提案した。

23. John C.H. **Spence** (Arizona State Univ.) (Coordinator)
24. Yimei **Zhu** (Brookhaven National Laboratory)
25. Gustaaf **Van Tendeloo** (Univ. of Antwerp)
26. Archie **Howie** (Univ. of Cambridge)

## Session 6 “Can we dispense with films and image-pick-up tubes? - high-resolution and high-quality image sensors - “

(高分解能・高性能イメージセンサー：フィルムやイメージピックアップ電子管に代わる測定器)

ホログラフィーおよび生物観察用電子顕微鏡においては、高分解能・高精度計測装置が必須である。特に電子線ホログラフィーにおいては測定物の電子情報をすべて取り込めるセンサーが必要となる。今までは、フィルムやイメージピックアップ電子管を用いてきたが、最近高性能 2 次元イメージ検出器や CCD カメラなどが開発されてきている。ナノバイオ計測の権威である大阪大学の難波啓一教授とカリフォルニア大学のマーク・エリスマン教授をコーディネータに迎え、計測器を開発している企業の研究者・技術者の参加も含め、最先端計測装置・技術を議論した。

難波教授は、バイオ電子顕微鏡を使う立場から特にタンパク質の 3 次元再構成に必要な電子検出器の特性について報告した。エリスマン教授は、自ら開発したレンズを組み合わせたシンチレーター装置と生物の 3 次元再構成用の電子検出器の詳細について報告した。長我部博士は 1.2 MV 超高压最先端電子顕微鏡用の CCD カメラの仕様を議論した。ムーニー博士は高分解能透過電子顕微鏡用の高速直接検出カメラ (DDC) の開発について、マクムラン博士はフィルムを代替できる画素センサー

(CMOS を用いた monolithic active pixel sensor (MAPS)) と FEI のファルコン検出器の特性と使用例について報告した。

27. Keiichi **Namba** (Osaka Univ.) (Coordinator)
28. Mark H. **Ellisman** (Univ. of California, San Diego) (Coordinator)
29. Nobuyuki **Osakabe** (Hitachi, Ltd.)
30. Paul **Mooney** (Gatan)
31. Greg **McMullan** (MRC-Laboratory of Molecular Biology)

## Session 7 “Can we observe atomic arrangements in three dimensions?”

(3次元で原子構造は見えるか?)

物質は原子が3次元に並ぶことによって形成されている。最先端電子顕微鏡の高い分解能は3次元に並んだ原子の姿を厳密に捉えることによって、はじめてその役目を果たす。この分野で最も優れた業績を上げているケンブリッジ大学のポール・ミドグレイ教授をコーディネータに迎えて、この挑戦的なテーマの議論を行った。

ミドグレイ教授は、3次元の原子分解能での6種類の計測方法についての現状と将来展望を議論した。ヴァン・タンデルー教授は、「3次元原子分解能は可能か?」という本質的な問題を提起して、S/N比を上げることと電子断層撮像法を用いることで可能になると報告した。金子教授は、 $\text{CeO}_2$ の実験結果を用いて電子断層撮影法による3次元での原子分解能の達成条件を議論した。コッホ博士は、3次元像再生には、一般に使われている オフ・アクシス電子線ホログラフィーではなく、インライン電子線ホログラフィーが有効であると主張した。陣内教授は、電子断層撮影法を用いて複雑な形をしたソフトマテリアルの3次元計測の例を紹介した。

32. Paul **Midgley** (Univ. Cambridge) (Coordinator)
33. Gustaaf **Van Tendeloo** (Univ. of Antwerp)
34. Kenji **Kaneko** (Kyusyu Univ.)
35. Christoph T. **Koch** (Max Planck Institute for Metal Research)
36. Hiroshi **Jin-nai** (Kyoto Institute of Technology)

## Wrap-up Session: Summary by session coordinators

(セッションコーディネータによるまとめ)

電子顕微鏡の理論を育てた英国電子顕微鏡学会の最長老であるケンブリッジ大学のアーチボルト・ハウイー教授を総合コーディネータとして、各セッションのコーディネータと組織委員にそれぞれのセッションのまとめと今後の進展について報告してもらった。

Workshop Coordinator: Archie **Howie** (Univ. of Cambridge)

Session Coordinators: Hannes **Lichte**, Daisuke **Shindo**, Christian **Colliex**,

David J. **Smith**, John C. H. **Spence**, Mark H. **Ellisman**, Paul **Midgley**

Organizing Committee members: Hirotaro **Mori**, Yimei **Zhu**

招聘講演者を代表して総合コーディネータのハウイー教授が、本会議の趣旨・内容・意義についてまとめられたレポート (Workshop Coordinator's Report) を添付する。

以上