

The Materials Research Society of Japan

発行 © 一般社団法人 日本 MRS 事務局

〒231-0002 横浜市中区海岸通 3-9

横浜ビル 507D

http://www.mrs-j.org/ Tel. 045-263-8538

||||||| やあ こんにちは |||||||

薄膜半導体材料作製プロセスにおける「プロセス診断」

大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻電子光科学領域 招聘教授 ^{まつだ あきひさ} 松田 彰久



松田 彰久

(まつだ あきひさ)

大阪大学大学院基礎工学研究科システム創成専攻電子光科学領域 招聘教授

機能性材料の創生・物性制御においては、材料作製プロセスの制御が必須となる。プロセス制御に対しては、プロセスを微視的に理解することが重要であり、そのために、「プロセス診断によるプロセス制御」と言う材料研究における新しい概念が提唱された。私がこの概念を実践に移すにあたり、「the simplest case」と言うキーワードが私の頭に強く染みついていた。私の恩師である故菊池誠博士の言葉である。なるべく単純な系を選択することにより、複雑系での理解も可能であるとの意味である。そのため、材料として、薄膜トランジスタや薄膜太陽電池への応用が活発に行われているアモルファスシリコンや微結晶シリコン半導体薄膜を選択し、作製方法であるプラズマ CVD (化学気相堆積) プロセスを研究ターゲットとした。

このプロセスは、プラズマ中におけるモノシラン (SiH₄) や水素 (H₂) 原料ガス分子の電子励起分解過程から始まる。元素としては Si と H だけの「the simplest case」に近いものである。それでも、プラズマ中での分解生成反応種は SiH₃、SiH₂、SiH、Si、H と複雑であり、これら反応種と母ガス分子との二次反応で生成する Si_nH_m のような高次シラン系反応種や微粒子も含まれる多種多様な化学種が存在し、さらにイオン種までもがプロセスに関与してくるのである。この「quasi simplest case」であるプラズマ中での電子励起分子分解過程や二次反応過程を理解するために、数多くの気相診断法が導入された。発光分光分析法 (OES)、質量分析法 (MS)、レーザー誘起蛍光法 (LIF)、コヒーレント反ストークスマン分光法 (CARS)、赤外吸収分光法 (IRLAS)、紫外吸収分光法 (UVLAS)、キャビティリングダウン法 (CRDS) 等である。これらにより、各種反応種の定常状態密度が定量された。さらに、モノシラン分子の分子軌道計算も詳細になされ、プラズマ気相中での電子励起分解による反応種生成過程が理解されてきた。また、生成反応種の主として親分子との反応素過程の研究も進み、プラズマ気相におけるプロセス全体が理解されてきた。

これに気を良くして、多種多様な反応種が到達して膜形成を起こす、膜成長表面反応プロセスを微視的に理解しようと、各種膜成長表面反応診断法の適用が試みられた。分光エリプソメトリー法 (SE)、グリッド法 (GM)、ステップカバレッジ法 (SCM) や高速反射電子線回折法 (RHEED) 等である。これらの方法で得られる理解は、膜成長表面の微視的凹凸、反応種の表面における物理的反射率や表面の微結晶構造であり、膜成長表面反応プロセスの理解にとつて、多くの情報を得ることができた。しかし、最も重要な知見が得られた方法は、膜成長表面反応診断法と言うにはとても違和感があり、どちらかと言うと、泥臭い方法であった。膜成長速度の計測や、作製された膜の各種物性評価法による作製された膜の構造評価法の適用であった。なぜならば、作製された膜の物性・構造は膜成長表面反応で決定されるからである。すなわち、薄膜成長とは「ある瞬間膜成長表面であった部分は、次の瞬間、膜成長にともないバルクの一部を形成する」ものであり、作製された膜の構造には膜成長時の表面反応の痕跡が確実に残っているはずだからである。

作製された膜の製膜速度 (表面段差測定: TS)、化学組成 (X 線光電子分光法: XPS、オージェ電子分光法: AES 等)、結合状態 (赤外吸収分光法: IRAS や XPS)、表面形状 (原子間力顕微鏡法: AFM)、屈折率や質量密度 (各種光学的物性評価法)、結晶性 (X 線回折法: XRD、ラマン分光法: RSS) そして微視的構造である点欠陥密度 (電子スピン共鳴法: ESR) 等の、いわゆる膜物性・構造評価法のほとんど全てが膜成長表面反応診断法となったのである。名付けて「考古学的プロセス診断法」である。これにより、膜成長反応プロセスの理解は驚異的に進んだのである。もちろん、これらの「考古学的表面反応診断法」を適用する場合も、前述の「the simplest case」を目指すことが重要である。具体的には、膜成長表面反応に寄与する多種多様な反応種を反応寿命の違いを利用して分離する方法がとられた。ラジカル分離法 (RSM) である。プラズマと膜成長表面の間にメッシュ電極を挿入し、膜成長表面とメッシュ電極の間隔を広げることにより、長寿命反応種である SiH₃ 反応種だけの膜成長が可能となる。こうして膜成長表面反応プロセスの診断に「the simplest case」が実現できたのである。すなわち、材料成長プロセスにおける「プロセス診断法」とは、なにもスマートで高度な分光法を指すのではなく、膜成長を行ったら必ず行うであろう、膜厚測定や各種物性測定が実は重要なプロセス診断法なのである。もちろん、系を「the simplest case」に持っていくことが必要であるが。

また、プロセス研究で重要なことは、プラズマ気相診断においては「どの反応種がどの程度の密度存在するか」とか、考古学的膜成長表面診断においては「この膜はこのような構造をもっており、そのためこのような物性が現れるのである」とかで満足してしまっているといけないと強くことを強調しておきたい。プラズマ気相診断の結果では「何が反応種密度の違いの原因なのか」とか、考古学的膜成長診断の結果では「膜成長表面でどのように反応が起こり、膜の物性・構造がどのように構築されてきたのか」を考えることが重要である。発掘調査をしている考古学者が遠い昔の生活を偲ぶように、プロセス研究者は、少し前に起こっていた膜成長表面反応に思いを馳せることが大切なのである。

目次

- 01 やあ こんにちは
薄膜半導体材料作製
プロセスにおける
「プロセス診断」
松田 彰久
- 02 トピックス
熱分析による多段階
固体反応の分離と速
度論的解析
古賀 信吉
- 04 トピックス
多バンド超伝導の最
近の話題
田中 康資・柳澤
孝・西尾 太郎・有
沢 俊一
- 06 ご案内
To the Overseas
Members of MRS-J
編集後記
- 10 一般財団法人前川
報恩会 平成 27 年度
学術研究助成申請受
付のお知らせ

トピックス



HIROSHIMA UNIVERSITY

熱分析による多段階固体反応の分離と速度論的解析

 広島大学大学院教育学研究科 教授 古賀 信吉
 こが のぶよし

1. はじめに

固体の関与する化学反応に対する熱重量測定 (TG) や示差走査熱量測定 (DSC) の測定結果を用いて、その速度論的挙動を解析する手法は、本多式熱天秤の開発 (1915) や鯨井・赤平による絶縁体の劣化挙動の解析 (1925) など、日本発祥の手法として知られている¹⁾。また、積分型の速度論的解析法である小澤法 (1965) は、現在世界で最も広く用いられている解析手法の一つである²⁾。一般に、この手法を用いた速度論的解析では、理想的な単一の速度論的過程を仮定した式(1)をもとに、見かけの活性化エネルギー (E_a)、アレニウスの前指数因子 (A)、および動力学的モデル関数 ($f(\alpha)$) を決定し、これらの速度論的パラメータを用いて速度論的挙動を特徴づける。

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha) \quad (1)$$

この解析結果は、材料合成プロセスの評価から製品マネジメントにいたる広い分野において、また、寿命評価や安全性評価の指標として用いられている。

一方で、固体の関与する反応は、均一反応と異なり、特異的な反応サイトの分布とその反応の進行に伴う変化、固体生成物による反応や気体生成物の拡散過程の阻害などの物理幾何学的要因に大きく影響される不均一過程である³⁾。このため、反応率 α と温度 T を関数とする理想的な速度式 (式(1)) では十分に説明できない種々の現象が観測されることになる。また、その影響により、熱分析により得られる反応の速度論的データが、多段階反応の様相を呈することも少なくない。このような複雑な反応過程に対して理想化された速度式とそれを基にした速度論的解析法を適用した場合、得られる見かけの速度論的パラメータは、本来の物理化学的意義を伴わないものとなることが少なくない。

2. 多段階固体反応

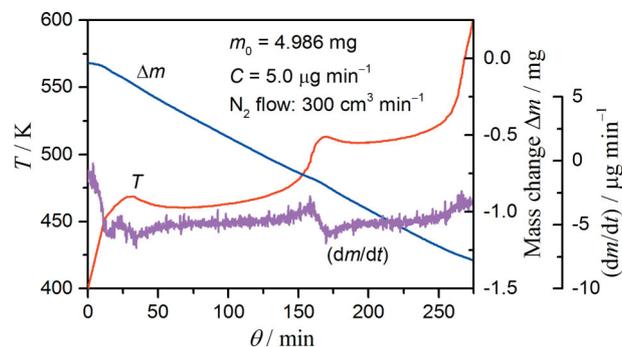
固体の関与する化学反応においては、固体の熱分解反応と固体生成物の空気酸化の過程が重複して逐次的に進行する場合のように、複数の化学反応の関与によって多段階的な反応挙動を示す場合がある。この場合も、均一反応における多段階反応とは異なり、それぞれの反応過程が種々の物理幾何学的要因に支配されて進行するため、単純に定常状態近似を適用して総括反応の速度式を導出することは一般的には困難である。一方で、単一の反応過程においても、物理幾何学的要因により反応の進行に伴う自生の反応条件の変化が生じ、これに伴う反応の速度論的挙動の変化から見かけ上の多段階反応となることがある。このような多段階反応の速度論的解析のためには、それぞれの反応段階の化学的あるいは物理幾何学的な特徴を理解したうえで、反応段階間の相互関係を考慮しながら各反応段階の速度論的特徴を個別に検証していくことが必要となる。このような解析のための基本的ツールとし

ては、以下に述べるような熱分析の測定において反応段階を分離する方法のほか、数学的あるいは速度論的に重複した反応段階を分離し、速度論的解析を行う方法が考えられる⁴⁾。

3. 熱分析による多段階反応の分離

固体試料中で異なる化学反応が同じ温度範囲で同時に進行する場合や中間生成物を介して逐次的に進行する場合においては、熱分析の測定条件に特定の反応の速度論的挙動に影響を及ぼす条件を課して、同時に進行する化学反応を分離することが可能な場合がある。例えば、炭酸塩の分解反応が重複した総括反応の構成反応の一つである場合、反応雰囲気中の二酸化炭素分圧を増加させると、化学平衡論的な作用により炭酸塩の分解反応の温度範囲が高温側に移動し、重複した複数の化学反応の挙動を分離できる可能性がある。反応雰囲気中の水蒸気分圧を上昇させて測定を行うと、直接的には水蒸気の関与しない反応でも、反応温度範囲が低温側に移動する特異な現象を示す例も多数報告されている⁵⁾。

熱分析の測定技法においては、従来の測定技法とは逆の論理により、プログラムした反応速度の変化挙動を実現する温度プロファイル測定する技法 (試料制御熱分析 (SCTA)) を適用すると、同一の温度範囲で逐次的に進行する反応などを分離することが容易になる⁶⁾。反応速度を一定値 C に保持するための温度プロファイル測定する速度制御熱分析 (CRTA) は、SCTA の代表的な例である (図-1)。一方で、制御反応速度として小さい一定値を設定して CRTA 測定を行うと、通常の測定においては物理幾何学的要因により見かけ上多段階反応の様相を呈する反応過程を、スムーズな一段階反応として追跡できることがある。これは、自生反応条件の変化を極力抑えることができる CRTA 測定の特徴による。


 図-1 $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6 - \text{ZnCO}_3$ 共沈試料の CRTA 測定例⁴⁾

4. 数学的な分離解析

測定条件や測定技法の工夫により重複した反応の分離が困難な場合や特定の反応条件での反応挙動の解析を目的とする場合、反応過程の分離の観点からは好ましくない測定条件で得た熱分析曲

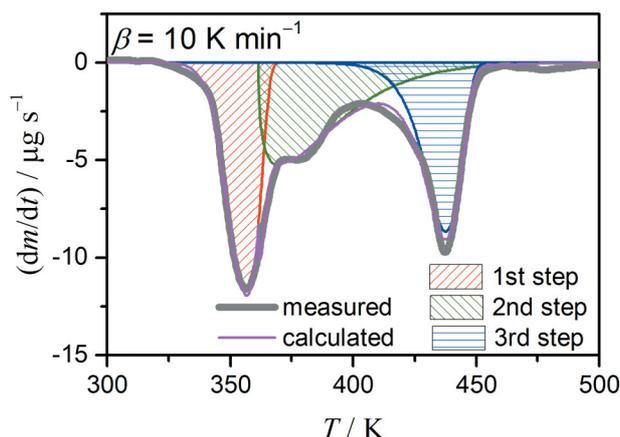


図-2 Weibull 関数を用いた酢酸マグネシウム 4 水和物の脱水反応の数学的分離解析の例⁷⁾

線からそれぞれの反応の速度論的挙動を解析していくことになる。論理的に総括反応の速度式を立式するためには、成分反応の相互関係を数学的に定式化する必要があるが、そのための情報を実験的に得ることが可能なケースは極めて限られている。このため、経験的なアプローチではあるが、成分反応を独立した反応過程と仮定し、スペクトルやクロマトグラムピーク分離と同様な数学的手法により熱分析の時間微分曲線をピーク分離し、成分反応を抽出することが考えられる。直線的な非等温条件下での固体反応に対する熱分析の時間微分曲線は、その物理幾何学的反応様式により非対称の形状をとることが多いため、数学的分離関数として Weibull 関数や Fraser-Suzuki 関数などが用いられている(図-2)⁴⁾。数学的分離により抽出した成分反応を、式(1)の基本的速度式を仮定して速度論的に解析する。この解析により得られる速度論的パラメータは、 E_a 値については用いた分離関数によらず一定の値が得られることが多いが、 $f(\alpha)$ および A 値については用いた分離関数に大きく依存する傾向があるため、解釈上の注意が必要である。

5. 速度論的な分離解析

数学的な分離解析と同様に、総括反応を独立した成分反応の和と考えると、式(2)のような積算型の速度式が得られる。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sum_{i=1}^n c_i A_i \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{RT}\right) f_i(\alpha_i)$$

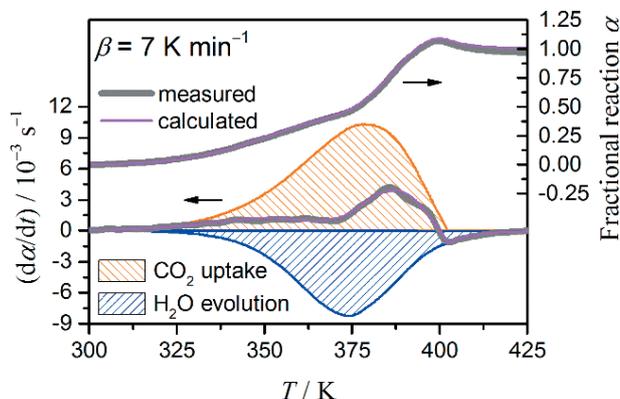


図-3 水酸化リチウム 1 水和物の分解過程と炭酸化過程の速度論的分離解析の例⁸⁾

$$\text{with } \sum_{i=1}^n c_i = 1 \text{ and } \sum_{i=1}^n c_i \alpha_i = \alpha \quad (2)$$

ここで、 c_i は反応段階 i の総括反応速度への寄与率である。式(2)のすべての速度論的パラメータに初期値を設定したのち、測定データを式(2)の速度式でフィッティングするための最適値を非線形最小自乗法に基づいたアルゴリズムを用いて求めることにより、速度論的な分離解析が可能となる(図-3)⁴⁾。この時、最適化計算のために用いる各速度論的パラメータの初期値が、この解析結果の速度論的な意義を担保するうえで特に重要である。各反応段階の寄与率やアレニウスパラメータの初期値としては、単一過程を仮定した従来の速度論解析あるいは上述した数学的分離解析の結果を用いることが考えられる。各反応段階の動力学的モデル関数のタイプを選定する上では、種々の顕微鏡観察の手法により得られる反応に伴う試料の形態的变化についての情報が有用な手掛かりとなる。

反応条件に依存した速度論的な分離解析の結果を系統的に比較検討することにより、各反応段階の速度論的特徴や反応段階間の相互作用に関する情報を得ることができ⁸⁻¹⁰⁾。また、速度論的分離解析は、重複した多段階反応から特定の反応段階を抽出し、速度論的に考察する目的にも有効である^{11,12)}。さらに、速度論的分離解析の結果を基にして各反応段階の相互関係を考察し、総括反応の速度式を導くことも期待される。

6. おわりに

熱分析による固体反応の速度論的解析は、材料研究から製品管理の広い分野で用いられる定番の解析ツールであるが、画一的な方法論として実際の反応に適用し、物理化学的意義を伴わないパラメータを用いて科学的な議論を展開しようとする例が散見される。本報で紹介した多段階固体反応の分離解析は、そのような現状を改善するための実用的手法として用いることができる。また、総括反応の速度挙動を論理的に定式化するための情報を得る手段としても期待される。

参考文献

- 1) 古賀信吉, 熱測定, **42**, 2-9 (2015).
- 2) N. Koga, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **113**, 1527-1541 (2013).
- 3) N. Koga, H. Tanaka, *Thermochim. Acta*, **388**, 41-61 (2002).
- 4) N. Koga, Y. Goshi, S. Yamada, L. A. Perez-Maqueda, *J. Therm. Anal. Calorim.*, **111**, 1463-1474 (2013).
- 5) 例えば, N. Koga, J. M. Criado, H. Tanaka, *Thermochim. Acta*, **341**, 387-394 (1999).
- 6) 古賀信吉, J. M. Criado, 田中春彦, 熱測定, **27**, 128-140 (2000).
- 7) N. Koga, Y. Suzuki, T. Tatsuoka, *J. Phys. Chem. B*, **116**, 14477-14486 (2012).
- 8) Y. Noda, N. Koga, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 5424-5436 (2014).
- 9) M. Yoshikawa, S. Yamada, N. Koga, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 8059-8070 (2014).
- 10) S. Kitabayashi, N. Koga, *J. Phys. Chem. C*, **118**, 17847-17861 (2014).
- 11) N. Koga, D. Kasahara, T. Kimura, *Cryst. Growth Des.*, **13**, 2238-2246 (2013).
- 12) N. Koga, K. Nishikawa, *Cryst. Growth Des.*, **14**, 879-887 (2014).

連絡先

〒739-8524 広島県東広島市鏡山 1-1-1
 広島大学大学院教育学研究科 古賀信吉
 nkoga@hiroshima-u.ac.jp Phone/Fax : 082-424-7092

トピックス



多バンド超伝導の最近の話題

国立研究開発法人産業技術総合研究所 田中 康資・柳澤 孝
 東京理科大学理学部 西尾太一郎
 国立研究開発法人物質・材料研究機構 有沢 俊一

やんちゃな多バンド超伝導

多バンド超伝導は、やんちゃである。

超伝導の微視的理論の決定版である BCS 理論や、現象論として長く使われてきた Ginzburg-Landau (GL) 理論の枠内に収まりきれない。Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論のシナリオでは、超伝導転移温度 (T_c) で、超伝導ギャップがフェルミ面上にいつせいに開き始め、温度を下げるとそのギャップがだんだん開いていく。ちょうど板かまぼこを板の短い辺に平行に切った断面の曲線状の縁を、板の部分から一番高いところまで縁をたどるように。多バンド超伝導は、そのような BCS 理論のシナリオに頓着せず、平均場理論から導かれる T_c よりはるか高温ですでにギャップを人知れず開く、くらしいことは平気である可能性がある。GL 理論の掟では、磁場さえかけなければ、 T_c でおとなしく 2 次転移をして、その温度以下では、2 度と超伝導転移をしない。多バンド超伝導では、そんなことは縛りにもならないので、「2 個目の超伝導転移」の可能性に常に注意を払わなければならない。それが、多バンド超伝導の「自由すぎる」ところであり、魅力でもある。超伝導電子対がエントロピーを持ち続けるといことが、これらの枠に収まり切れない原因である^[8]。そして、多バンドという電子構造が、このエントロピーの元となる内部自由度を作り出す「仕掛け」となっている。

本稿では、多バンド超伝導の持つ魅力、そして今後期待できる大きな「伸びしろ」を読者に伝えられればと思う。また、遷移金属超伝導体、多層型高温超伝導体、硼化物超伝導体、鉄系超伝導体という多バンド超伝導体全般に対して、「多バンド超伝導」の立場から、詳しい解説記事を挙げておく^[1]。なお、本稿の文献リストに収まりきれない参考文献のリストも随時参照できるように Web 上に用意しておいた^[2]。

多バンドだからできること

バンド間での相互作用がとて小さいとき（バンド内での電子対をつくる相互作用の数 % 程度以下）、多バンド超伝導は「多成分化」する。強いバンド内相互作用がバンド内の位相を揃え、弱いバンド間相互作用が、「バンド間ジョセフソン相互作用」として、バンド間を繋ぐという描像である。前の節で紹介した「やんちゃ」ぶりは、このような「多成分化」した多バンド超伝導でおきる現象である。「バンド毎に半独立状態の量子凝縮相が生まれる」と見ることもできるし、「すべてのバンドに広がった波動関数を持つ電子対がバンド毎に異なる複数の位相を孕んだまま凝縮する」と見ることもできる。

従来超伝導は、バンド間ジョセフソン相互作用が強くなった極限であると位置づける。強いバンド間相互作用によって、すべてのバンドの位相は同じ値に固定される。多バンド超伝導は、BCS 理論や GL 理論を否定するものではなく、これらを包含しつつ、超伝導の枠組みを広げるものである。

多バンド超伝導のお隣さん、素粒子・原子核・宇宙論

超伝導の枠組みを広げていくと、思わぬ「お隣さん」との近所付き合いが始まる。それが、素粒子・原子核・宇宙論で取り扱われている「場の理論」である。従来の超伝導では、量子位相は一つであるが、多バンドでは、取り扱う位相がバンドの数だけ増えるので、位相が複数になる。このような量子凝縮の「ゲージ場」は高次の内部自由度を持つ「非可換ゲージ場」と共通しており、時として、類似性のあるトポロジカルな構造を生み出す。多バン

ド超伝導と素粒子・原子核・宇宙論との関連性については、新田らや、柳澤による解説記事がある。

解き放たれる新しい量子位相「バンド間位相差」

すこし具体的なイメージを説明したい。多バンド型多成分超伝導では、バンド毎に定義された位相の「差」をとることで「バンド間位相差」という新しい量子位相が生まれている^[3]。この「バンド間位相差」というのは、実は、電磁場から隔離されている。波数空間では別のバンド上にあっても、実空間では同じ点における位相なので、電磁場の効果は、「差」をとることで完全になくなってしまふからである。「バンド間位相差」が持つ「電磁不活性」という性質は、後で触れるように「バンド間位相差」をソリトン^[3]にしたときに、直感的に理解できるようになる。

忘れられた「隠れた量子位相」

「バンド間位相差のゆらぎ」というのは、1966 年 Leggett によって初めて議論された。Leggett が議論したのは、「小さな位相差」であり、その効果も微々たる物と考えられた。その当時の技術では観測はとて難しいだろう、と Leggett 本人自身が断じてしまった。Leggett の議論は BCS 理論のマイナーコレクションと考えられ、Leggett 自身も、この揺らぎが出てくるような超伝導はこの世にはないだろうとすぐに諦めてしまった（その代わり、考え方を ³He の超流動に転用し、2003 年にノーベル賞を獲得している）。翌年 1967 年に 2 バンド超伝導と関係が深い、電弱統一理論が Weinberg によって提唱されるのであるが、残念ながらすぐには、素粒子論との接点は生まれなかった。

多バンド超伝導研究の再来

1987 年に多層型高温超伝導体が開発された。この超伝導材料が Leggett の条件を満たす材料であるという理解が進み、状況が変わった（詳しい経緯は、他の解説記事に譲る）。2001 年には、バンド間位相差をぐるっと 360 度回してみようよ、ということが提案された。ここから、多バンド型多成分超伝導の持つやんちゃぶりが次々と指摘されることになる。MgB₂ や鉄系超伝導フイバーも後押しとなった。Leggett が諦めてから 30 年以上たつて、多バンド超伝導を「トポロジカル材料」と捉えようという研究の流れが生まれたのである。

「人工的ベリー位相」位相差ソリトン

バンド間位相差をぐるっと 360 度回すと、「ソリトン」になる^[3]。トポロジカルソリトンと呼ばれるもので、短冊をぶら下げたゴム紐を握るとできる「局所的な握じれ」と同じである（ピンとこない方は、簡単な模型の作り方が報告されているのでそれを作ってみよう）。ソリトン部分では、第 1 バンドと第 2 バンドで電流が逆向きに流れ、実電流が流れない。当然磁場も発生しない。「位相差ソリトン」は電磁不活性なトポロジーなのである。計測屋さん的にはソリトン部分だけ「ツイストペア」になっていると思ったほうが分かりやすい。さらに、位相差ソリトンを模式

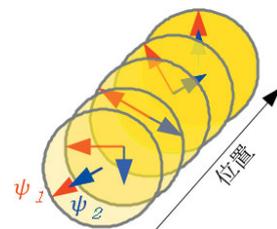


図-1 バンド間位相差ソリトンのトポロジー。矢印は、バンド毎の秩序関数 ψ_i を複素平面状態で表現したもの。Copyright © AIST. All rights reserved.

的に書いてみると(図-1)、右周りと左回りに回った各バンド各々の位相は、決してもとの位相で出会うことはなく、どこか違う場所で再会することが分かる。位相差ソリトンの頭と尻尾の間で、位相シフトが起きる。この位相シフトは、電磁場のベクトルポテンシャルによるものではない。いわば、「人工的に生み出されたベリー位相」によるものである。

量子をぶった切る「人工的ベリー位相」

図-1の頭と尻尾をくっつけて輪を作ると、「人工的ベリー位相」がとんでもないことをやらかしてくれることがすぐ分かる。頭と尻尾の位相シフトを輪の中に入る磁束で「補償」するためには、輪の中には「分数磁束量子」を入れなければならない^[3]。つまり、位相差ソリトンがいるおかげで、磁束量の量子化条件が変わり、磁束量子がさらに細かくなってしまいます。この磁束量の量子化の破綻については、「擬似的な多バンド超伝導」の実験で、スタンフォード大学が直接確認している。種を明かせば、バンド毎に「巻数」(位相が何回廻っているか)が異なっているのが、「磁束量の量子化の破綻」のトリックになっている。薄膜やバルクでは、この分数磁束量子を持った渦糸がソリトンで繋がれた「渦糸分子」ができる可能性があり、実験も報告されている。渦糸分子の描像は、陽子や中性子が分数電荷を持つクォークから構成されるという描像と類似のものであるという指摘もある。

バンド間位相差の実験研究を阻むもの

バンド間位相差というのは、電磁不活性な量なので、デコヒーレンスのない量子ビットが構成できるなど、いままでにないデバイスを生み出す潜在能力がある。一方で、電磁不活性ということ、従来のエレクトロニクスの延長で制御する方法がないという問題点も生む。

この問題点の克服のためにさまざまな提案がなされたが、どの提案も実験するには難のあるものばかりであった。このためバンド間位相差の実験的研究は限られているというのが現状である。

「電流誘起位相差」という新機軸

最近、超伝導細線に電流を流すだけで位相差が生じるという新しい機構が提案された^[4]。細線に電流を流すと、電子対の速度が上がるが、対破壊も同時に起きて電子対の密度が減る。電子対の速度の上昇と数の減少の兼ね合いで臨界電流密度も決まる。ここで、超伝導が強いバンド(バンド内相互作用が強いバンド)と弱いバンドの二つのバンドで構成された2バンド超伝導を考えてみよう。電子対の運動量(正準運動量から電磁場の寄与を除いたもの)は、位相の傾きとプランク定数の積である。位相差が固定されていると、位相の傾きも両方のバンドで同じにならなければならない。しかし、これだと、大電流を流した時、対の速度が速すぎて弱いバンドが先に「ヘタって」しまう。臨界電流近くでは、強いバンドだけが頑張らなければならない。強いバンドは一人で頑張るのは嫌なので、弱いバンドにも少しは頑張らせて欲しい。そこで、弱いバンドには、「速度を落とすでもいいので、対の数の減少を抑制」して、電流を流し続けてもらうことにする。こうすることで、強いバンドの負担も減る。強いバンドが一人で頑張るより、より多くの超伝導電流を運ぶことができるわけである。代償として、バンド毎に位相の傾きが異なるということになる。これが、バンド間位相差を生み出す。バンドが非等価だから起きる現象であることは注意すべきことである。縮退に基づく多成分系では同じように電流誘起位相差を起こすことはできない。

バンド間位相差を固定しているのは、境界条件。バンド間ジョセフソン相互作用ではない

バンド間ジョセフソン相互作用は、バンド間の位相差をなくしようと頑張るが、細線ではバンド間の位相差を完全には固定することができない。実は、どんなに僅かな電流でも、バンド間の位相差は生じてしまう^[4]。バンド間位相差を固定しているのは、細線部分のバンド間ジョセフソン相互作用ではなく、細線の両側にくっついている「電極」部分が要求している境界条件である。いかに細線部分で「バンド間位相差を作った方がお得」でも、細線の端では位相差はゼロにロックされている(固定端)。バンド間位相差は、固定端では容易には作り出せない。

もっと自由にしてやろう

多バンド超伝導の「自由な振る舞い」であるバンド間位相差を

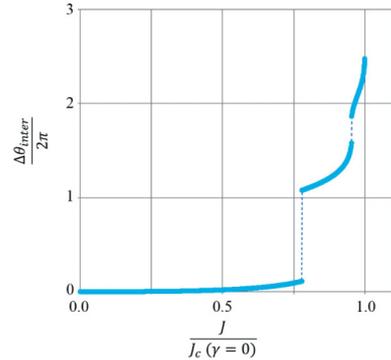


図-2 多バンド超伝導細線における電流誘起位相差の計算機シミュレーション。細線の片側は固定端(位相差なし)もう一方は自然境界条件(位相差あり)とした場合。図では自然境界条件をとる端における位相差を表している。電流を流すことで、必ず位相差が生じる。また、点線で示した部分では、位相差が不連続にジャンプする。計算で想定した値は、バンド内相互作用による凝縮エネルギーがバンド間相互作用による凝縮エネルギーの300倍、細線の長さは強いバンドのコヒーレンス長の長さの100倍、弱いバンドの凝縮エネルギーは、強いバンドの凝縮エネルギーの半分という条件である。外部電流は、バンド間相互作用のないケースの臨界電流(J_c ($\gamma=0$))で規格化している(Reprinted with permission from [4]. Copyright 2015 by Elsevier B. V.)。

引き出すには、境界条件も「自然境界条件」にしてあげなければならない。つまり、電流量は連続に保つが、位相差は固定しないという条件である。もし、細線の最後に「常伝導」部分を付け加えることができれば、そこではバンド間位相差をゼロにする軌がないので、自然にバンド間位相差が生じることになる(その様子を計算機シミュレーションで例示したのが図-2である)。例えば、細線の一部をさらに細くして、この部分だけ臨界電流を下げてみよう。この「さらに細くした部分」での臨界電流値より高く、他の細線部分の臨界電流値よりも低い電流を流し込めば、「さらに細くした部分」だけ常伝導にできるわけである。さらに、位相差が細線の中で360度以上廻ったところで、突然電流を切れば、細線の内部に位相差の捩じれを閉じ込めることができるはずである。バンド間位相差が生じることを拒んでいた境界条件が、今度は、「バンド間位相差が解けることを拒む」境界条件へと役割を変える。以前から、電流を流したときに位相差が生じるという議論と、電流を流したところで位相差は生じない、という議論が両方存在し、議論がかみ合っていなかった。「境界条件をどうとるか?」と言うことを考えていなかったためにおきた混乱であった。境界条件を駆使して、位相差が生じた状態を、電流を切ったあとも保持するという発想もなかった。

始まった実験検証

電流誘起による位相差の検出を目指して実験も始まっている。スタンフォード大の位相差ソリトンの検証に使われた回路は、「閉回路」であった。一方、電流誘起位相差の検出を目指したときは、電流値を外部電流源で制御する「開回路」が有利である。超伝導で作ったリング状回路に、電流の注入端子と吐出端子となる線を加えたものは、超伝導の量子振動を見るために伝統的に使われている回路である。LittleとParksが行った実験では、外部磁場下で、リングの抵抗値の振動を測定するので、Little-Parks振動としばしば呼ばれる(教科書では T_c の振動として紹介されている。実験では、抵抗の振動を観測する)。多バンド超伝導を意識した、Little-Parksの実験はあまりされていないが、もし、位相差が電流で誘起できるのであれば、それが観測にかかってもおかしくない。(Tl, Cu)(Ba_{1-x}, Sr_y)₂Ca₃Cu₃O₇(Tl-1223)の薄膜でLittle-Parksの実験を行うと、抵抗が外部磁場に対して周期的に振動するLittle-Parks振動が観測できるが、磁場を変えていくと、その周期的振動に、突然の位相シフトが起きることが見いだされた(図-3)^[5]。このような周期性の乱れは、スタンフォード大の実験でも報告されており、電流誘起の位相差が原因とも考えられる。実験と理論の間を埋める研究が現在進められている。

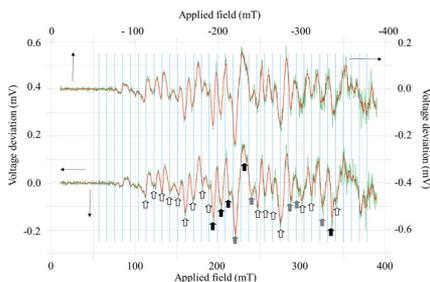


図-3 多バンド超伝導薄膜 (Ti, Cu) (Ba_{1-x}, Sr_x)₂Ca₃Cu₃O₇ の Little-Parks 量子振動。素子は 5 μm の幅の線に 0.1 μm の穴を開けたもの (NIMS-ナノプラットフォームで作製)。量子振動成分は、ベースラインを差し引くことによって求めている。ばらつきのある大きな線は生データ、移動平均によって求めたスムーズな線も示す。上部と下部は、それぞれ、電流の向きを変えて測定したものである。白矢印で示した周期的振動が、黒矢印で示した周期的な振動に「スリップ」する。うなりではなく、周期性の突然の「跳び」であると考えられ、電流誘起位相差の発生と関係があると見られる (Reprinted with permission from [5]. Copyright 2015 by Elsevier B. V.)。

多バンド型時間反転対称性の破れ、質量ゼロモード、逆同位体効果…尽きない新現象

これまで紹介してきた現象以外にも、多バンド超伝導には、様々な可能性や物理現象が議論・報告されている。たとえば、「非縮退系での時間反転対称性の破れ」(3バンド間に秩序関数の符号を反転させるバンド間ジョセフソン相互作用があるときに起きる可能性が指摘されている)、「質量ゼロの位相差モード」(位相差がまったく定まらなくなって自由に変化することができるようになる現象)、「逆同位体効果」(電子格子相互作用と電子-反強磁性ゆらぎ相互作用の拮抗によって通常と同位体効果とは逆に、同位体の質量を重くすると T_c が上昇する現象)、タイプ I でも II でもないタイプ 1.5 と呼ばれる超伝導などが挙げられる。これからの次々に新しい物理が見出されるだろう。次にこれらの新現象の起源を紹介したい。新しい物理の発見のヒントになるだろう。

BCS 理論に消された理論

従来超伝導で取り入れられていない決定的な要素とはなんだろうか。それこそが、多バンド超伝導の新現象の「種」ではなからうか? ここでは、1950年代、BCSと覇を競っていた「荷電ボーズ粒子」理論、つまり、Schafrothの理論にその「種」を求めてみたい。「電子対」の対破壊に超伝導の本質を求めた Bardeenは、それを再現する理論を学生の Schrieffer に求めた。一方、Schafrothはマイスナー効果に重きを置き、「荷電ボゾン」の振る舞いに焦点を合わせるようにと学生の May を指導したようである。結果としては、Schafroth-May組みは、Bardeen-Schrieffer に遅れをとった。不運は重なり、Mayの博士論文の内容が *Physical Review* で出版される前に、Schafroth 先生は、オーストラリアのアウトバックの砂塵となった。飛行機事故であった (May はその後、理論生態学の開祖となり、英国王立協会の会長に上り詰めている。後日談ではある)。

Schafroth の亡霊

「弱く相互作用したボーズ凝縮」では「集団励起状態」も残る。Bardeen はボゾン凝縮の集団励起状態の可能性を承知した上で

「それを取り入れなければならないような実験的現象は見られないので」これをあえて「無視した」。そのおかげで、Schrieffer の超伝導ギャップ方程式は閉じたのである。当時知られていた超伝導物質相手では、そんな理論で間に合った。Schafroth と共に棺に入れられたはずだった「ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC)」的見方は、その後も BCS-BEC クロスオーバーという議論の中で命脈を保った。そして、金属ガスの BEC が実験的に成功してから、一気に BCS も飲み込む形で発展を遂げる。

波数空間での BCS-BEC クロスオーバー

多バンド超伝導にバンド間位相差という集団励起状態があるとすれば、それは、BEC 色が強いことを意味している。バンド間位相差の揺らぎを許したままの超伝導も可能と言うことになる。まずは、バンド内だけで位相をそろえる「第1の超伝導転移」が起き、それより低温で、バンド間位相差の揺らぎがなくなるために起きる「第2の超伝導転移」または「クロスオーバー」が起きるということである。また、高温でバンド間位相差が0または180度の状態の超伝導転移が起きた後、さらに低温でバンド間位相差が0でも180度でもない、時間反転対称性が破れた状態への相転移やクロスオーバーが起きることも期待される^{[6],[7]}。バンド間位相差の揺らぎを生み出すよう内部自由度は、p波三重項超伝導の内部自由度のように行儀はよくない。p波三重項超伝導の内部自由度のようにBCS理論では縮退している自由度の揺らぎは、揺らいでもBCSギャップ方程式に影響は与えない。BCSのハミルトニアンに、内部自由度と結合する付加項を付け加えて初めて揺らぎの効果が見えてくる。一方多バンド超伝導の位相差揺らぎは、BCSハミルトニアンの中で、BCSのギャップ方程式に直接返り血を浴びせることになる。BCSの極限では、集団励起状態がなくなるので、バンド間の相互作用を強くすることで、BECからBCSへのクロスオーバーが起きていることになる。

しかし、ボソンの粒子径とボソンの粒子間隔(密度)の大小で決まる従来の「実空間型」BEC-BCSクロスオーバーとは異なる。多バンド超伝導でのBEC-BCSクロスオーバーは、バンド内相互作用とバンド間相互作用の大きさの比が支配する、波数空間におけるBEC-BCSクロスオーバーである。このような新しいクロスオーバーを念頭に置くことで、これからの、次々と新しい可能性が見出されていくに違いない。

【参考文献】

- [1] Multicomponent superconductivity based on multiband superconductors. Y. Tanaka. *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 034002.
- [2] <https://sites.google.com/site/multiband2015/home>
- [3] Soliton in two-band superconductor. Y. Tanaka. *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 017002.
- [4] Current-induced massless mode of the interband phase difference in two-band superconductors. Y. Tanaka, I. Hase, T. Yanagisawa, G. Kato, T. Nishio, S. Arisawa. *Physica C* **516** (2015) 10-16.
- [5] Observation of quantum oscillations in a narrow channel with a hole fabricated on a film of multiband superconductors. Y. Tanaka, G. Kato, T. Nishio, S. Arisawa. *Solid State Commun.* **201** (2015) 95-97.

連絡先

国立研究開発法人産業技術総合研究所 田中康資
y.tanaka@aist.go.jp Phone +81-29-861-5720 Fax +81-29-861-5720

ご 案 内

■第25回日本MRS年次大会

一技術革新を先導する先進材料研究一

日時：2015年12月8日(火)～10日(木)
場所：横浜情報文化センター (横浜市中区日本大通11) 口頭発表・ポスター会場、横浜市開港記念会館 (横浜市中区本町1-6) 口頭発表、万国橋会議センター (横浜市中区海岸通4-23) 口頭発表、波止場会館 (横浜市中区海岸通1-1) 口頭発表、産業貿易センタービル (横浜市中区山下町2) 口頭・ポスター発表
総合受付：12月8～10日、横浜情報文化センター 6階 ホワイエ 午前9時より

懇親会：日時：12月9日(水)、場所：横浜マリンタワーホール (横浜市中区山下町15)
費用：5,000円
▽シンポジウム *：国際シンポジウム
A 新規機能性材料
A-1 *機能性酸化物マテリアル
Representative：岩田展幸(日大)、市村正也(名工大)、Correspondence：岩田展幸(日大)、市村正也(名工大)、有沢俊一(物材機構)、遠藤民生(岐阜大)、Co-Organizers：遠藤和弘(金沢工大)、池永訓昭(金沢工大)、金子 智(神奈川県産技セン

ター)、寺迫智昭(愛媛大)、内山哲治(宮城教育大)

A-2 ドメイン構造に由来する物性発現と新機能材料
Representative: 武貞正樹(北大)、Correspondence: 大和田謙二(原研)、Co-Organizers: 坂本 渉(名大)、塚田真也(島根大)、中嶋宇史(東京理科大)、永田 肇(東京理科大)、西松毅(東北大)、樋口 透(東京理科大)、藤沢浩訓(兵庫県立大)、保科拓也(東工大)、松浦直人(CROSS 東海)、米田安宏(原研)、王 瑞平(産総研)

A-3 スマート・インテリジェント材料・デバイス
Representative: 古屋泰文(弘前大)、Correspondence: 中尾航(横浜国大)、Co-Organizers: 浅沼 博(千葉大)、西 義武(東海大)、石山和志(東北大)

A-4 ソフトアクチュエータ
Representative: 奥崎秀典(山梨大)、Correspondence: 安積欣志(産総研)、Co-Organizers: 吉田 亮(東大)、千葉正毅(千葉科学研)、田實佳郎(関西大)、須丸公雄(産総研)、橋本 稔(信州大)、瀧脇正樹(九工大)

B. 環境・エネルギー材料

B-1 燃料電池用材料、デバイス、及びシステム開発の新展開
Representative: 森 利之(物材機構)、BRITO Manuel E.(山梨大)、Correspondence: 森 利之(物材機構)、Co-Organizers: 前川康成(原研)、山本春也(原研)、酒井 均(日本碍子)、東 雄一(HONDA)、石原顕光(横浜国大)、姜 友松(シンクロン)、峰重 温(兵庫県立大)、森永隆志(鶴岡高専)、伊藤滋啓(鶴岡高専)、斎藤美和(神奈川大)

B-2 暮らしを豊かにする材料—環境・エネルギー・医療—
Representative: 笠谷和男(山口大)、Correspondence: 栗巢普揮(山口大)、Co-Organizers: 山本節夫(山口大)、喜多英敏(山口大)、小松隆一(山口大)、諸橋信一(山口大)、中塚晃彦(山口大)、藤森宏高(山口大)、上高原理暢(東北大)、井奥洪二(慶応大)、田中輝光(九大)

B-3 人工光合成実現に向けた材料開発の最前線
Representative: 阿部 竜(京大)、Correspondence: 阿部 竜(京大)、Co-Organizers: 井上晴夫(首都大学東京)、石谷 治(東工大)、八木政行(新潟大)、池田 茂(阪大)

B-4 *強相関機能材料の進展と挑戦
Representative: 山浦一成(物材機構)、Correspondence: 山浦一成(物材機構)、Co-Organizers: 辻本吉廣(物材機構)、WANG Gang (IOP/CAS)、SUN Ying (Beihang Univ.)

C. ナノ材料

C-1 フラレンとカーボンナノマテリアル研究の最先端
Representative: 宮澤薫一(物材機構)、Correspondence: 宮澤薫一(物材機構)、若原孝次(物材機構)、Co-Organizers: 安藤寿浩(物材機構)、橋 勝(横浜市立大)、緒方啓典(法政大)、中村成夫(日本医科大)、青木伸之(千葉大)

C-2 自己組織化材料とその機能 XIII
Representative: 中西尚志(物材機構)、Correspondence: 山中正道(静岡大)、矢貝史樹(千葉大)、Co-Organizers: 加藤隆史(東大)、下嶋 敦(早大)、長田 実(物材機構)、吉尾正史(東大)、早川晃鏡(東工大)、宮元展義(福岡工大)、高口 豊(岡山山大)、籾内一博(中部大)、木俣光正(山形大)、永野修作(名大)

C-3 分子性薄膜の作製・評価・応用—高度な配向制御、配向解析、および機能発現を目指して—
Representative: 藤森厚裕(埼玉大)、Correspondence: 神島謙二(埼玉大)、Co-Organizers: 池上敬一(産総研)、岩田展幸(日大)、大貫 等(東京海洋大)、加藤徳剛(明治大)、松本陸良(東京理科大)、三浦康弘(桐蔭横浜大)、山本 寛(日大)

C-4 分子技術が拓く新材料
Representative: 齋藤永宏(名大)、Correspondence: 上野智永(名大)、Co-Organizers: 中村 淳(電通大)、由井宏治(東京理科大)、石崎貴裕(芝浦工大)、是津信行(信州大)、藤田正博(上智大)、長尾祐樹(北陸先端大)、仁科勇太(岡山山大)、岡本敏宏(東大)

C-5 *先端プラズマ技術が拓くナノマテリアルズフロンティア
Representative: 石川健治(名大)、Correspondence: 白谷正治(九大)、Co-Organizers: 石川健治(名大)、井上泰志(千葉工大)、金子俊郎(東北大)、金 載浩(産総研)、白谷正治(九大)、節原裕一(阪大)、寺嶋和夫(東大)、林 信哉(九大)、萩野明久(静岡大)、古閑一憲(九大)

D. 先端界面科学

D-1 ソフトマテリアル—ポリマーが生み出す溶液・表面・界面・バルクの機能
Representative: 渡邊順司(甲南大)、Correspondence: 渡邊順司(甲南大)、Co-Organizers: 鈴木淳史(横浜国大)、原 一広(九大)、八木原 晋(東海大)、加藤紀弘(宇都宮大)、三俣 哲(新潟大)、清田佳美(東洋大)

D-2 *界面におけるナノバイオテクノロジー
Representative: 松田直樹(産総研)、Correspondence: 松田直樹(産総研)、Co-Organizers: 大塚英典(東京理科大)、田中賢(山形大)

D-3 界面物性評価
Representative: 山下良之(物材機構)、Correspondence: 山下良之(物材機構)、吉川英樹(物材機構)

D-4 先導的スマートインターフェースの確立
Representative: 長崎幸夫(筑波大)、Correspondence: 三浦佳子(九大)、桑折道濟(千葉大)、Co-Organizers: 前田瑞夫(理研)、高井まどか(東大)、高原淳(九大)、齋藤永宏(名大)、一木隆範(東大)、菊池明彦(東京理科大)、芹澤 武(東工大)、青柳隆夫(日大)、陳 国平(物材機構)、吉本敬太郎(東大)、松下伸広(東工大)、手嶋勝弥(信州大)、林 智広(東工大)、岸村顕広(九大)、石原 量(東京理科大)、澤田敏樹(東工大)、池田 豊(筑波大)、木口崇彦(芝浦工大)

E. 先端材料創製技術

E-1 *イオンビームを利用した革新的材料創製
Representative: 雨倉 宏(物材機構)、Correspondence: 中尾節男(産総研)、青木学聡(京大)、Co-Organizers: 馬場恒明(長崎県工技センター)、伊藤久義(原研)、岸本直樹(物材機構)、小林知洋(理研)、永田晋二(東北大)、西川宏之(芝浦工大)、辻 博司(京大)、Feng CHEN (Shandong Univ.)、Paul K. CHU (City Univ. Hong Kong)、Daryush ILA (Fayetteville State Univ.)、Wolfgang ENSINGER (Technical Univ. Darmstadt)

E-2 計算機シミュレーションによる先端材料の解析・機能創成
Representative: 吉矢真人(阪大)、Correspondence: 吉矢真人(阪大)、Co-Organizers: FISHER Craig A. J. (ファイナセラミックスセンター)、大場史康(東工大)、上杉徳照(大阪府立大)、篠嶋 幸(茨城大)、小谷岳生(鳥取大)、香山正憲(産総研)、田村友幸(名工大)

E-3 セラミックスおよびガラス材料の構造形成に基づく材料特性・信頼性の向上
Representative: 安田公一(東工大)、Correspondence: 安田公一(東工大)、Co-Organizers: 安盛敦雄(東京理科大)、打越哲郎(物材機構)

E-4 有機イオンエレクトロニクスに基づく先端科学と技術
Representative: 金藤敬一(大阪工大)、Correspondence: 小野田光宜(兵庫県立大)、Co-Organizers: 宇戸禎仁(大阪工大)、梶井博武(阪大)、久保いづみ(創価大)、杉本豊成(大阪府大)、高嶋 授(九工大)、中山敬三(近畿大)、永松秀一(九工大)、長谷川有貴(埼玉大)、馬場 暁(新潟大)、バンディージャムスタイル(九工大)、福田武司(埼玉大)、藤井彰彦(阪大)、森武洋(防衛大学校)

F. 新規科学技術創製

F-1 エコものづくりセクション
Representative: 岡部敏弘(近畿大分子工学研)、Correspondence: 大谷 忠(東京学芸大)、福田浩二(近畿大分子工学研)、辻 純一郎(ポリテクセンター埼玉)、小川和彦(ポリテクセンター広島)、Co-Organizers: 伊東 繁(沖縄高専)、高崎明人

(芝浦工大)、合田公一(山口大)、吉澤秀治(明星大)、本間千晶(北海道立総研機構)、間野大樹(産総研)、篠原嘉一(物材機構)、中島謙一(国立環境研)、須田敏和(三ツ沢環境技術研究所)、柿下和彦(職能開発総合大学校)、清水洋隆(職能開発総合大学校)、秦 啓祐(ポリテクセンター千葉)、水渡博幸(高度ポリテクセンター)、定成政憲(職能開発総合大学校)、齋藤周逸(森林総研)、菊池圭祐(静岡県工研)、荒武志朗(宮崎県木材利用技術センター)

F-2 新しい分析・評価技術—材料と環境への適用

Representative: 西本右子(神奈川大)、Correspondence: 西本右子(神奈川大)、小棹理子(ソニー湘北短大)、Co-Organizers: 遠藤 聡(アドバンス理工)、鈴木俊之(パーキンエルマージャパン)、勝田正一(千葉大)、平山直紀(東邦大)、内海太祐(ソニー湘北短大)、津越敬寿(産総研)

F-3 マテリアルズ・フロンティア

Representative: 長瀬 裕(東海大)、Correspondence: 長瀬裕(東海大)、伊熊泰郎(神奈川工大)、Co-Organizers: 伊熊泰郎(神奈川工大)、野間竜男(東京農工大)、長田 実(物材機構)、渡邊友亮(明治大)、萩原俊紀(日大)、岡村陽介(東海大)

F-4 持続可能社会に向けた環境・材料開発教育と安全

Representative: 加納 誠(東京理科大)、Correspondence: 岡田稯謙(地球環境緑蔭塾)、柴田義文(安信経営工学研)、小林頌昌(地球環境緑蔭塾)、Co-Organizers: 岡野富行(葛飾区科学教育センター)

F-5 スポーツにおける材料科学

Representative: 村上秀之(物材機構)、Correspondence: 下田一哉(物材機構)、Co-Organizers: 阿江通良(筑波大)、河合季信(筑波大)

■第4回日本MRS講演会

—単結晶に迫る/超える透明バルクセラミックスの開発の現状と課題—

主催: 一般社団法人日本MRS

日時: 2015年9月29日(火)13:00~17:00

会場: 横浜情報文化センター大会議室

協賛: 電気化学会、粉体工学会、公益社団法人日本セラミックス協会、公益財団法人神奈川科学技術アカデミー

定員: 60名

プログラム

13:00 開会 (横浜国大) 多々見純一

13:10 新しい材料科学の創造~透明セラミックスの開発を通じて ((株)ワールドラボ) 池末明生

14:10 透明結晶化ガラスとレーザーによる単結晶パターンニング (長岡技科大) 小松高行

15:10~15:20 休憩 (名刺交換等)

15:20 光学的異方性をもつ結晶系でのセラミックスの透明化 (長岡技科大) 田中 諭

16:20 透明蛍光窒化物セラミックスの開発 (神奈川科学技術アカデミー) 高橋拓実

17:00 閉会

申し込み方法: 日本MRSホームページ第4回「講演会参加申込みフォーム」<http://www.mrs-j.org/ws/ws20150929.php>からお申し込みください。

参加費: 参加費は当日講演会受付にてお支払いください。

法人会員: 8,000円(法人会員は2名まで無料)、個人会員: 5,000円、学生会員: 2,000円、一般非会員: 10,000円、学生非会員: 3,000円

協賛学会会員は、日本MRSの会員価格にて参加出来ます。当日受付にて、所属学会・協会名をお知らせください。協賛会員の会員証があればお持ち下さい。

問合せ先 日本MRS事務局 Tel: 045-263-8538、Fax: 045-263-8539、E-mail: secretariat@mrs-j.org、<http://www.mrs-j.org/ws/ws20150929.php>

■MRS-J協賛シンポジウム

▽電気化学セミナー3「初心者のための電気化学測定法—実習

編」、主催: 電気化学会、協賛: 日本MRSほか、日時・会場: 8月25日(火)~26日(火)、早稲田大学西早稲田キャンパス、申込方法: <http://www.electrochem.jp/promotion/index.html>、問合せ先: 電気化学セミナー係、csj@electrochem.jp

▽材料分析・評価技術活用への理解: 本質に迫るツボ—汎用から最先端まで—、主催: 日本金属学会関東支部、協賛: 日本MRSほか、日時: 8月31日(月)9:30~16:45、場所: 東京工業大学大岡山キャンパス西8号館情報理工学研究科1001会議室、申込先: 日本金属学会関東支部事務局 多賀三千代、Tel. 080-4833-3136、E-mail: jim-kanto@mtl.titech.ac.jp

▽第25回無機リン化学討論会「山形大会」、主催: 日本無機リン化学会、共催: 日本化学会、協賛: 日本MRSほか、日時: 9月28日(月)~29日(火)、場所: 山形大学工学部(米沢キャンパス)、申込先: 山形大学大学院理工学研究科・川井貴裕、Tel. & Fax: 0238-26-3107、E-mail: mukirin2015@yz.yamagata-u.ac.jp

▽電気化学会関東支部第51回学際領域セミナー 基本から考えるリチウムイオン二次電池、日時・場所: 9月25日(金)、明電舎大崎会館、詳細: 電気化学会関東支部、ikezuki@electrochem.jp

▽The 9th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-9)、日時・場所: 2015年10月19日~21日、つくば国際会議場、「電子あるいは光学材料に関する透明酸化薄膜の会議(TOEO-9)」と共同で開催、世話人・連絡先: 物質・材料研究機構・瀬川浩代、E-Mail: SEGAWA.Hiroyo@nims.go.jp

▽金属学会セミナー「半導体における点欠陥と拡散—基礎と最先端デバイス—」、協賛: 日本MRSほか、日時・場所: 11月12日(木)、東京工業大学大岡山キャンパス西9号館、問合せ先: 日本金属学会セミナー参加係、E-mail: meeting@jim.or.jp

▽2nd International Symposium on Frontiers in Materials Science (FMS2015)、主催: FMS2015 Organizing Committee、協賛: 日本MRSほか、日時・場所: 2015年11月19日(木)~21日(土)、早稲田大学、詳細: 早稲田大学基幹理工学部・山本知之、e-mail: fms2015@cms.sci.waseda.ac.jp

▽13th International Conference on the Chemistry of Selenium and Tellurium、日時: 2016年5月23日~27日、場所: 長良川国際会議場(岐阜市)、連絡先: 岐阜大学工学部化学・生命工学科、村井利昭、mtoshi@gifu-u.ac.jp

▽The 11th International Conference on Coatings on Glass and Plastics (ICCG11)、日時: 2016年6月12日(日)~16日(木)、場所: Conference Center, Braunschweig, Germany、詳細: 青山学院大・重里有三、e-mail: yuzo@chem.aoyama.ac.jp、<http://11.iccg.eu/en/home>

■IUMRS 関連会議

▽IUMRS-ICAM 2015 14th International Union of Materials Research Societies-International Conference on Advanced Materials, October 25 (Sunday)~29 (Thursday), 2015, Venue: the Jeju International Convention Center, Jeju, Korea, IUMRS-ICAM2015 Secretariat: Tel. +82-2-6925-0510 Fax. +82-2-6925-0520, Email. info@iumrs-icam2015.org

■新刊紹介

Trans. Mat. Res. Soc. Japan, vol. 40, No. 2, 2015 が出版されました。搭載された論文の年度別、シンポジウム別の論文件数は以下のとおり。

2012年

・第22回年次大会 ▽B Innovative Material Technology for the Realization of the Green Vehicle 1

・IUMRS-ICEM2012 ▽C-5 Electroactive Polymer Actuators, Sensors and Energy Harvesters 1, ▽D-6 Electric Insulating Materials 1

2013年

・第23回年次大会 ▽L Fabrication, characterization and application of molecular thin films~structural analysis and control toward the realization of novel functions~ 1, ▽O Nanobiotechnologies on Interfaces 2, ▽S Analytical and Assessment

Methods (in Materials and Environmental Technologies) 1
2014 年
・第 24 回年次大会 ▽A Frontier of Nano-materials Based on
Advanced Plasma Technologies 1
・IUMRS-ICA2014 ▽B-1 Biomaterials and Biomimetic Mate-
rials 1, ▽B-3 Materials in Biomechanics and Biotribology 1, ▽
B-5 Advanced Study in Science and Technology for Soft
Matter 1, ▽B-8 Chemical Sensing and Sensor Devices for
Chemical Space Information 1, ▽C-1 Magnetic Materials and

Spintronics 1, ▽C-3 Nitride and Diamond Semiconductors 1, ▽
C-8 Advanced Oxide Materials—Bulks, Thin Films, and
Nanostructures 3, ▽D-1 Innovative Material Technologies
Utilizing Ion Beams 1, ▽D-2 Frontier of Nano-Materials Based
on Advanced Plasma Technologies 1, ▽D-12 Advances in
Computational Materials Science and Technology 2, ▽E-1
Materials Frontier 1, ▽G-1 Crystallography in Materials
Science & Engineering—Memorial for IYCr2014 1, ▽一般投稿論
文 1



To the Overseas Members of MRS-J

■Process Diagnostics for Thin Film Growth p. 1
Akihisa MATSUDA, Visiting Professor, Department of Systems
Innovation, Graduate School of Engineering Science, Osaka
University

Importance of new materials-research concept “process control
via process diagnostics” with the simplest case is mentioned for
the growth of amorphous and microcrystalline silicon in the
plasma-CVD process.

It is emphasized that the most useful diagnostic techniques for
the surface-reaction process is so called “archeological diagnosis”,
in which archeologists remember the life in those days during
their excavation. Namely, materials researchers should think
always about the surface-reaction process when they evaluate
properties and structure of deposited materials.

■Kinetic Deconvolution of Multistep Solid-State Reactions
using Thermal Analysis p. 2
Nobuyoshi KOGA, Professor Dr., Graduate School of Education,
Hiroshima University

This paper focused on kinetic analysis of the thermoanalytical
curves for the overlapping multistep reaction in solids. The
possible experimental methods to separate the overlapping
reaction steps were introduced with highlighting a technique of
Sample Controlled Thermal Analysis. The mathematical and
kinetic methods for analyzing the kinetics of the respective
component reaction steps were reviewed and those practical
usefulness was discussed.

■Recent Topics of Multi-band Superconductors p. 4
Yasumoto TANAKA, Chief Senior Researcher, Oxide Electronics
Group, Electronics and Photonics Research Institute, National
Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
Japan

Takashi YANAGISAWA, Chief Senior Researcher, Supercon-
ducting Group, Electronics and Photonics Research Institute,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
(AIST), Japan

Taichiro NISHIO, Associate Professor, Department of Physics,
Tokyo University of Science, Japan

Shunichi ARISAWA, Principal Researcher, Electronics Group,
Superconducting Properties Unit, Environment and Energy
Materials Division, National Institute for Materials Science
(NIMS), Japan

The interband phase difference soliton (i-soliton) has opened
up a new field in the study of superconductivity. This artificial
Berry phase is defined as the quantum phase difference between
two bands, where the interband Josephson interaction is
considerably weaker than the intraband pair interaction. Many
properties related to the i-soliton cannot be fully understood in
the conventional superconducting paradigms, such as the
Bardeen-Cooper-Schrieffer and Ginzburg-Landau theories. These
properties can, however, be explained by non-abelian gauge field
theory, which is applicable to particle, nuclear, and cosmological
physics. We present a brief introduction of the past, present, and
future perspectives of multicomponent superconductivity of
multiband superconductors based on the study of i-solitons.

■The 25th Symposium of the Material Research Society of
Japan p. 7

The 25th of the MRS Symposium will be held in Yokohama
from December 8-10, 2015, to discuss the latest developments in
the fields of “Advanced Materials Research as the Basis for the
Technological Innovation.”

編 後 執筆者の皆様と編集に関わる方々の御助力により、本号をお送りすることができます。記事では薄膜プロセス、超伝
集 記 導、熱分析と分野は違いますが、実験・計測・解析手法、理論の数世代にわたる発展が述べられており、日本の研究文化
の奥深さを感じることができました。大学で学生諸君の就職活動に関わっておりますと、このような系統的理解を各人の
中に涵養することが社会的にも求められている事を感じます。各分野の発展の指針となった考え方・哲学に触れる事は研究・技術者を
目指す若者にとって得難いことと思うところです。MRS-Jの活動が、そのための中核となり続けることを願う次第です。(寺田記)

© 日本 MRS 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学大学院理工学研究科 中川研究室内

http://www.mrs-j.org/ E-mail: nakagawa@pe.titech.ac.jp

2015 年日本 MRS ニュース編集委員会 第 27 巻 第 3 号 2015 年 8 月 10 日発行

委員長: 中川茂樹 (東京工業大学大学院理工学研究科)

委員: 寺田教男 (鹿児島大学大学院理工学研究科)、小椋理子 (湘北短期大学情報メディア学科)、川又由雄 (芝浦メカトロニクス(株))、岩田展幸 (日本大学理工学部)、Manuel E. BRITO (山梨大学クリーンエネルギー研究センター)、松下伸広 (東京工業大学応用セラミックス研究所)、小林知洋 (国立研究開発法人理化学研究所)、伊藤 浩 (国立東京工業高等専門学校)、鮫島宗一郎 (鹿児島大学学術研究院)、狩野 旬 (岡山大学大学院)、寺迫智昭 (愛媛大学大学院)、籠宮 功 (名古屋工業大学大学院)、西本右子 (神奈川大学)、鈴木俊之 ((株)パーキンエルマー ジャパン)、新國広幸 (国立東京工業高等専門学校)、寺西義一 (東京都立産業技術研究センター)

顧問: 山本 寛 (日本大学理工学部)、岸本直樹 (国立研究開発法人物質・材料研究機構)

編集: 清水正秀 (東京 CTB) 出版: 株式会社内田老鶴圃 印刷: 三美印刷株式会社

一般財団法人 **前川報恩会**

平成27年度学術研究助成 申請受付のお知らせ

①助成対象となる研究

地球温暖化対策を目的とした、熱エネルギーの有効利用に資する研究（農業分野等との学際的研究も含む）

②申請期間

平成27年9月1日～平成27年9月30日

③助成金額

助成総額 1,500万円（1件あたりの目安：50万円～300万円）

④助成期間

助成金交付日～平成28年12月末日

⑤申請資格

下記の要件を全て満たす者とする。

- (1).大学・企業等の法人、又は実体のある任意団体に所属する研究者。
- (2).研究者代表として申請内容に関する学会発表又は論文投稿を行う予定の者。

※資格要件ではないが、未来を担う熱心な若手研究者に対して積極的に助成金交付を行っていく方針である。

⑥選考手続

自薦・他薦による申請受付：平成27年9月1日～9月30日

外部有識者への諮問：平成27年10月上旬～11月中旬

理事会における承認：平成27年11月下旬～12月上旬

助成金交付：理事会における承認後速やかに交付する。

【ご連絡先】

一般財団法人 **前川報恩会 事務局**

〒135-8482 東京都江東区牡丹3-14-15

TEL:03-3642-1566 Mail:hounkai@mayekawa.org

詳細は、<http://www.mayekawa.org/>