

「極限環境状態における現象」
平成9年度採択研究代表者

本河 光博

(東北大学金属材料研究所 教授)

「強磁場における物質の挙動と新素材の創製」

1. 研究実施の概要

グループA

高強度Nb₃Sn線材を用いた液体ヘリウムフリー超伝導マグネットの開発を行った。

グループB

磁場中CVD法でYBCO₁₂₃膜の作製プロセスの開発研究を行い、磁場配向効果による結晶性改善と特性向上化および熔融法と磁場を組み合わせた新しい方法により、バルク材料の結晶性と特性の改善を行った。

グループC

酸化物高温超伝導バルク材や線材の臨界電流密度 J_c の向上には結晶配向性の向上が不可欠である。Bi系酸化物超伝導体においては、超伝導酸化物層が薄い(10 μ m以下)場合には有効な方法が開発され、高 J_c の長尺線材が製造されている。しかし、バルク材や層厚の厚い線材に対しては有望な方法が見い出されていない。この研究では、強磁場を利用してBi系酸化物超伝導体(Bi₂₂₁₂, Bi₂₂₂₃)の結晶配向育成を行ない、高結晶配向のバルク材を得るとともに高 J_c をもつ線材への適用を図る。平成10年度は、Bi₂₂₁₂の強磁場中育成(焼成)について調べ、強磁場が結晶の高配向化に極めて効果的で、バルクにおいては勿論、線材においても臨界電流密度 J_c の向上に非常に有力な方法あることを見い出した。11年度は、その最適化を図るとともに、77K応用において重要なBi₂₂₂₃相の磁場中結晶配向を試み、配向化が可能であることを見い出した。今後、この成果をBi₂₂₂₃電流リードや線材の J_c 向上に適用する。さらに、配向育成よりもさらに本質的なBi₂₂₁₂単結晶(ウィスカー)育成に及ぼす強磁場効果について調べ、超高周波ジョセフソンデバイスに必要な高品質Bi₂₂₁₂単結晶の育成を試み、その開発に資する。

グループD

反磁性物質の磁気浮上を結晶成長へ応用し、新しい物質合成の方法を開拓すること、および導電性ポリマーの電解重合過程に磁場を印加する磁気電解重合法を開発し、ポリマーの特性制御を行い、磁気電解重合膜を電極に用いる新しい化学

反応制御法を開発する。

グループE

タンパク質の良質大型単結晶の育成は、その3次元構造解析や、バイオ高機能性材料の創製に必須の課題である。しかし、タンパク質の結晶化は現在のところ非常に困難で、この段階がボトルネックとなっている。我々は、タンパク質の結晶化過程を磁場により制御できるのではないかと着想し、平成8年度より予備的な実験を開始した。そして、磁場が結晶の配向、個数(核形成過程)形に顕著な影響をおよぼす事を明らかにするなどの成果を上げてきた。平成11年度には、1)均一磁場が電解質水溶液中の「対流を抑制」すること、および2)磁場中で結晶化するとタンパク質結晶の「質」が格段に向上すること、を明らかにした。

グループF

極めて高い純度、極めて理想的な形状および表面が材料に要求され、静電浮遊、電磁浮遊、超音波浮遊などの溶融時に容器を使用しない物質創製方法が開発されてきた。反磁性による磁気力は原子・分子レベルでの重力の相殺であるため、宇宙空間の代替となる擬似的な微小重力状態の実現が期待でき、無容器での物質合成の手法として大変興味深い。本研究では、磁気浮遊溶融炉の開発を目的とし、いくつかの光学ガラスの浮遊溶融実験を行った。

グループG

アルカリ土類金属とTCNQの1:1錯体が室温でもスピンパイエルス状態を発現する事実によっても示唆されているように、TCNQ分子は電子親和力が強い上に、アニオンラジカル分子の p^* 軌道が遷移金属酸化物に比肩し得る電子相関を持っており、分子磁性の観点から興味深い。本研究では中性/ラジカル混合型と称されるTCNQ錯体について、電子物性に対する磁場中結晶成長の効果を探索することを目的として、強磁場超伝導材料研究センターの6T型液体ヘリウムフリー超伝導マグネットを用いて、磁場中結晶成長が分子光磁性、電気伝導、結晶構造などに及ぼす影響を調べている。平成11年度はカチオンとTCNQ分子が2:3の組成比から成る不均化錯体の典型的な化合物である、 Cs_2TCNQ_3 と $(NMe_4)_2TCNQ_3$ を取り扱った。

グループH

磁性材料の機能特性の発現やその改善には、微細組織の制御が重要であり、強磁場を利用した配向制御は極めて有効な方法のひとつであると考えられる。特に、強磁場中での薄膜成長においては、表面拡散の効果が期待できるためバルク試料よりも顕著な磁場中配向効果が生じる可能性がある。しかし、本プロジェクト以前には、成膜装置と強磁場発生装置を組み合わせることが困難であるという理由により、強磁場中で磁性薄膜を成長させるという研究は全く行われておらず、

成膜装置や成膜条件などに関する基本的なことさえも不明であった。本研究では、
(i) 磁性薄膜の成長過程における磁場配向効果を明かにすること、および、
(ii) それに基づき新規材料を創製することを目標として、強磁場中のスパッタリングにより磁性薄膜を作製し構造と磁気物性を調べている。

2 . 研究実施内容

グループ A

高強度Nb₃Sn線材の22 k m長尺線材の製造に成功した。本線材を用いて高強度Nb₃Snコイルを作製中であり、平成12年 6 月30日に納入される。本計画に関連して、東北大学と住友重機械工業(株)とにおける民間との共同研究により220mmの室温ボアを持つ7 Tの高強度Nb₃Sn線材を用いた液体ヘリウムフリー超伝導マグネットのR & D試作を行った。コイル内径261mm直径に(株)フジクラが製造した線径1mmの高強度Nb₃Sn線材を用いて設計製作した。用いた線材の臨界電流は本番の線材に比較して70%程の小さな臨界電流値であったが、220mmの室温実験空間に7.4Tを発生させることに成功した。120MPaの高張力巻線のNb₃Snコイルであり、世界で初めてR & WのNb₃Sn線材に対する張力巻線が試されたことを意味する。

平成12年度では本番コイルのクライオスタットを作製して、360mmの室温ボアに8 Tを発生できる高強度Nb₃Sn線材を用いた液体ヘリウムフリー超伝導マグネットが完成できるものと期待される。

グループ B

強磁場中でY 123を作製すると、c軸が磁場方向に揃うため配向性がよくなる。バルクY 123の磁場中溶融成長で顕著な結晶性改善効果があることを明らかにしてきた。この結果を踏まえて、我々は磁場中でのY 123薄膜作製のプロセス開発に着手した。わが国と米国においては、Y 123線材の長尺化を目指して国家プロジェクトに準じる研究が行われており、精力的に長尺テープが開発研究されている。k mサイズの長尺化は極めて困難であるが、一枚の円盤を作製することは遙かに易しいと考えられる。我々の狙いはY 123のピッター板の作製である。ab面の配向は強加工による板材のテキスチャーに頼り、c軸方向は磁場の配向制御で行おうとするものである。CVD法は大面積の成膜や高速度の成膜に適しており、金研では高温超伝導体が発見されてから3年後にはCVD法によるY 123の合成に成功している。我々は、CVD法によって合成されたY 123膜は極めて優れた臨界電流特性を示すことを見出し、1989年には世界で初めて77 Kの液体窒素温度で30 Tまでの強磁場まで臨界電流が存在することを示してきた。そこで、このCVD法によるY 123膜を磁場中で合成することを始めた。

本研究では、Y 123膜は超伝導体として用いるものではなく、新概念の半超伝導

状態で用いるためのものである。すなわち、抵抗状態の超伝導状態を活用しようとするものである。安定な磁束フロー状態は、高温超伝導体の特徴の1つである。この抵抗状態は 10^{-10} cm程度のもので、極めて低抵抗のパワー応用を目指すことが可能になる。超伝導の抵抗ゼロを活用するものでなく、抵抗体の1/100以下も小さな低抵抗高強度材のパワー応用である。したがって、この安定な低抵抗状態を我々は、semi-superconductivityと呼んで高抵抗の常伝導と抵抗ゼロの超伝導の中間の抵抗状態にある半超伝導状態に着目している。この状態における応用に対して、磁束フロー抵抗磁石およびピッター板の製造方法の名称で国有特許を出願した。

グループC

冷凍機冷却型超伝導マグネット（最大発生磁場: 11Tおよび15T）を用いて、Bi2212バルク材（高Pb置換Bi2212およびAg添加Bi2212）および高 J_c をもつPAIR法で作製したAg被覆Bi2212複合線材（超伝導酸化物コア厚さ60 μ m以上）については、前年度未解決の「輸送電流密度 J_c は印加磁場 H_a の増加とともに増大するが、印加磁場 $H_a = 7-8T$ 近傍で最大値を示した後、10Tになると急激に低下し、無磁場の場合とほぼ同じように印加磁場依存性が見られなくなってしまう」原因を調べるために、主に10T以上の（14Tまで）強磁場中での配向育成効果について調べた。結晶配向性や微細組織並びに T_c 、 J_c 等の超伝導特性を評価した。いずれの試料においても、結晶配向性（c軸が結晶育成中の印加磁場 H_a 方向に優先的に配向する）は10T以上の磁場においても、 H_a の増加とともに結晶配向度は増す。しかし、輸送電流密度 J_c は無磁場とほぼ同じ値を示し、磁場効果が認められない。交流帯磁率の測定の結果、強磁場育成では強いウィークリンクが現われることが判明した。詳細な微細構造との関連性は今後検討していく必要があるが、この結果は、強磁場が酸化物コアの微細組織の変化にも影響を及ぼすことを示唆している。一方、Bi2223バルク材の強磁場中配向育成について調べた。Bi2223相は、直接融液から成長するのではなく、Bi2212相を介して成長するため、通常の方法は適用されない。我々は、種々検討した結果、まずBi2212を磁場中で配向育成させ、その配向を維持したままBi2223相を成長させる方法を見出した。この方法で最も重要な点は、Bi2212相の配向育成時に、バルク中に混在する低融点の Ca_2PbO_4 などの酸化物（Bi2223相の育成に不可欠な酸化物）を流出させることなく、バルク中に均一に混在させることにある。そこで、我々は、Pbが酸素減圧（1% O_2 ）中ではBi2212相に大量固溶することに着目し、まずBi2212相を磁場中で配向成長させる際1% O_2 雰囲気で行ない、Pbの大部分をBi2212相に固溶させる。そのことによって、液相の流出が防げ、その後のBi2223相の配向成長を促すことができた。その際、Bi2223相の生成熱処理は、無磁場中で（従来のBi2223相の生

成熟処理とほぼ同じく) 大気中または8%O₂雰囲気中、830 近傍の温度で、150 時間以上の保持で十分であった。Bi2212相の結晶配向度がほとんどそのままBi2223相に引き継がれることが明らかになった。今後、成長条件の最適化を図り、Bi2223相の配向性の向上とBi2223相成長のメカニズムについて調べるとともに、バルク電流リードへの適用を検討する。これらの研究によって、Bi系超伝導体の結晶配向育成についてはほぼ終わることできるので、その後は、さらに本質的なBi2212単結晶育成に強磁場効果があるのかどうかを、Bi2212ウイスカー結晶育成を通して研究して行きたい。

グループD

1) 磁気浮上状態での結晶成長

磁気浮上は容器なしで液体を磁場中に保持することができるため、材料開発においては結晶成長への応用がまず考えられる。我々はハイブリッドマグネットを用いて、磁気浮上状態の水溶液から塩化アンモニウムをはじめとするいくつかのイオン結晶の成長過程の観察を行った。また、炭酸ガスレーザーを用いて、磁気浮上状態で雰囲気を制御した物質の溶融凝固の実験も試みた。塩化アンモニウムの結晶成長では液滴内で単一の核から成長するデンドライトが観察され、不均一核の発生を抑制できる可能性が示唆された。また、デンドライトが液滴の表面に沿って二次元的に成長する特異な現象も観察された。塩化カリウム、硝酸カリウムの結晶成長にも成功し、両者とも液滴のそこで気液界面に沿って成長する様子が観察された。さらに、磁気力を利用して溶液内で結晶の位置を制御する方法も見出した。これにより、容器を用いても、容器の壁や気液界面と非接触の状態、結晶を成長させる方法を開発することができた。ひずみの無い良質の単結晶成長技術への応用が期待できる。雰囲気制御溶融凝固の実験では、ZnSeの窓の付いたガラス容器の中に試料と不活性ガスを封入し、この中で磁気浮上した物質に炭酸ガスレーザーを照射できる装置を作製した。この装置を用いて、砂糖やパラフィンなどの溶融凝固に成功した。

2) 磁気電気化学

次世代のエレクトロニクス材料として多方面での応用が期待されているポリピロールを取り上げ、ヘリウムフリーマグネットを利用して磁気電解重合法による薄膜合成を試みた。これまでの研究成果で、膜が緻密になる組織変化があることが分かってきた。この組織変化はポリマーの酸化還元挙動に反映されることが分かった。ゼロ磁場膜の還元過程では、ドーパントのアニオン(p-トルエンスルホン酸イオン)の脱ドーピングが同時に起こるが、5 T膜ではカチオン(ナトリウムイオン)のドーピングが同時に起こることが明らかとなった。このことは、水晶振動子マイクロバランス法(戦略の予算で購入)を用いて、

還元過程における膜の微小質量変化を測定することにより確認された。磁場による膜の組織制御が、膜の特性制御につながることを明確に示した例である。さらに、重合膜を電極として用いて水素イオンの還元を調べたところ、5 T膜では水素イオンの還元が極めて起こりにくいことを見出した。この特性はグラフィイト電極のBasal plane およびEdge planeと似ており、電極表面でのポリピロールの配向性に起因しているものと考えられる。また磁気電解重合膜ではある種のカチオンに対して特殊吸着がおり、これを利用した反応制御の検討も行っている。このように、磁気電解重合膜を電極に用いることにより、新しい化学反応制御の方法を開発できそうである。

グループE

1) 均一磁場による水溶液中の「対流の抑制」

温度差を利用して定常的な密度対流をガラスセル中に誘起させる装置を作製した。そして、この対流発生装置を平成10年度に作成した強磁場下用光学顕微鏡に取り付け、10Tの均一磁場下で25wt% NaCl水溶液中の密度対流をその場観察した。粒径5 μm のポリスチレン・ラテックス粒子をNaCl水溶液にけんだくし、対流を可視化した。種々の温度差において対流の流速を測定したところ、10Tの均一・定常磁場により、水溶液中の対流が50%程度に抑制できることを見出した。これまで半導体融液などの金属液体の場合には磁場が対流を抑制することが知られていたが、「水溶液」の場合においても磁場が対流抑制効果を持つことを見出したのは、世界で初めての成果である。

2) 磁場を用いたリゾチーム結晶の「良質化」

強磁場中で育成したリゾチーム斜方晶系結晶のロッキング・カーブ測定および回折データ収集を、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所において行った。その結果、強磁場下で結晶を育成すると、(1)モザイシティーが減少し、かつ(2)温度因子が小さくなり、結晶の「品質」が格段に向上することを証明した。結晶の品質が向上した結果、回折スポットの数は約1.6倍に増加し、分解能も1.3 から1.1 に向上した。また(3)X線の照射による結晶の損傷度合いも、磁場下で育成した結晶では減少した。これらの成果は、世界初であることはもとより、磁場を用いて高品質のタンパク質単結晶を育成しようとする基本戦略が本質的に正しいことを証明する、極めて重要なものである。これらの成果は投稿中の下記論文以外に、二つの国際学会にて発表され、非常に大きな反響を得た。

グループF

ハイブリッドマグネット中で浮上状態にある物質にCO₂レーザー光で加熱を行う無容器溶融炉を開発した。この加熱方法はレーザー光を吸収しなければ溶融霧

囲気を選ばないため応用範囲が広い。マグネットから離れた場所に配置されたCO₂レーザーからの光は、集光鏡でマグネット内部に導入される。レーザー光は白金籠中に浮上する試料に数ミリ径に照射される。今回、ガラスの熔融挙動をより鮮明に観測するために、面状光源による照明、CCDカメラと照明の空冷系を装置に組み込んだ。本研究での無容器熔融実験では、試料に光学ガラスBK7およびB₂O₃ガラスなどを用いた。浮遊熔融中の浮遊物体の映像は、プリズムで反射された後、減光フィルターを通して直近に設置されたCCDカメラで観察した。光学ガラスBK7では、1750T²/mの磁場勾配BdB/dzが必要であることが計算される。CCDカメラで観察した磁場中におけるBK7ガラスの様子をFig.1に示す。試料(0.5g)の初期中心位置を、ポテンシャルの極小位置より約1mm下(z=74mm)になるように白金籠を設置した。中心磁場22.8Teslaでガラス試料は白金籠のほぼ中央(z=79mm)に浮上した。この位置での動径方向のポテンシャルエネルギーは極小値を取り、ほぼ軸中心に浮遊した。CO₂レーザーのエネルギーを約50Wまで1分で上昇させた。5分間の加熱を継続する間にガラスは軟化点を上回り、球状になった。2分間の冷却の後、磁場を下げて球状試料を回収した。

物質の磁気力は原子もしくは分子レベルの単位で働くため、単元素・単分子物質では完全に重力が相殺される。多元系物質の場合、各々の元素で帯磁率が異なり完全に重力を相殺できないが、残留する力は重力よりも小さくなる。本年度は無容器熔融炉の開発を行った。BK7やB₂O₃ガラスを試料として熔融実験を行い、球状ガラスの作製に成功した。真球からのズレは数十マイクロンのオーダーであった。具体的に得られた成果は

- ・ 時間に制限の無い無容器熔融装置および熔融方法を開発した。(日本特許成立/外国特許出願準備中)
- ・ いくつかのガラス物質の熔融実験を行い、球状ガラスを得ることに成功した。現状のハイブリッドマグネットを利用すれば、帯磁率が $-2.93 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{kg}$ より小さい反磁性物質の無容器熔融が可能である。

今後の見通しとして次のように考えられる。球状ガラスの真球からのズレは熔融時間や温度分布によるものと考えられ、均一な長時間の加熱が今後必要となるであろう。物質を熔融する他に、急激な加熱による蒸発・凝縮を利用してガラス微粒子の作製が可能であると考えられ、レーザー集光による微粒子作製を試み始めている。蒸発物質の対流の観察や化学組成による蒸発・凝縮の違いを観測することは現在報告は無く、微粒子作製の上で重要である。また、このような方法で作製された微粒子の磁場による配向構造が存在すれば、新素材として大変興味深い。今後は、レーザーやヒーターを利用した微粒子作製を行い、その物性評価を行う予定である。

グループG

平成11年度はカチオンとTCNQ分子が2:3の組成比から成る不均化錯体の典型的な化合物である， Cs_2TCNQ_3 と $(\text{NMe}_4)_2\text{TCNQ}_3$ を取り扱った。ここで NMe_4 は $\text{N}(\text{CH}_3)_4$ を表す。

結晶成長には室温において飽和溶液法の一つである溶媒混合法を用い，結晶成長装置全体を液体ヘリウムフリー超伝導マグネット内に入れた場合と入れない場合の比較を行った。その結果、磁場中では成長速度が著しく低下することが分かった。さらに、磁場中で成長させた結晶では結晶構造は変わらず、また優先方位もほとんど変わらないにもかかわらず、電子特性と構造相転移の機構が有意な影響を受けることを示唆するいくつかの光学データが得られた。このような磁場の影響は Cs_2TCNQ_3 において、より顕著である。また、電気伝導度の温度依存性にも変化の現れることが確認された。現在x線構造解析の精密化を進めているが、TCNQ分子の平面度が僅かに変化している可能性のあることが現時点で判明している。不均化錯体では溶液からの結晶化の際の不均化過程がp電子の反磁性だけでなく、 π^* 電子のスピンを通して外部磁場の影響を受けるものと推察される。これまでにほとんど例のないこのような現象の物理的原因をさらに追求し、体系化することを目指して、今後は構造解析を一層精密化すると共に、外部磁場を変えて成長させた結晶について赤外分子振動、ラマン散乱、近赤外・可視電子遷移など種々の光学スペクトルの温度および圧力依存性の実験研究を行う予定である。

グループH

本年度は主にFe-Si-OおよびCo薄膜を中心に実験を進め、以下の結果を得た。なお、本プロジェクトで用いた装置および基本的な実験方法は既に報告したとおりであり、磁場印加方向は膜面垂直方向、主な成膜条件は到達真空度 2×10^{-6} Torr以下、スパッタガス圧5 - 30 mTorr、高周波投入電力150 Wである。印加磁場 $H_{\text{appl}}=4\text{T}$ 、プロセスガス中酸素量 $\text{O}_2/\text{Ar}+\text{O}_2=2.2\%$ の条件で作製した $\text{Fe}_{50}\text{Si}_{50}\text{-O}$ 薄膜および $H_{\text{appl}}=4\text{T}$ 、 $\text{O}_2/\text{Ar}+\text{O}_2=0\%$ の条件で作製したCo薄膜について述べる。磁場を印加しない場合には、均一性の良い薄膜が得られるのに対して、磁場印加により特徴的な模様(膜質および膜厚の分布)が生じている。これらの模様の生成メカニズムは今のところ明かでないが、Fe-Si-O系での実験により、磁場の強さのみならずスパッタガス中の酸素量にも依存することが分かった。また、Co薄膜の模様はたいへん面白いことに4回対称になっている。スパッタリング現象が起こるカソード側の構造は回転対称性を有しており、ターゲットから飛び出してくる原子の分布は4回対称にはなっていないと考えられる。すなわち、基板電極近傍におけるCo原子の堆積過程が、磁場を印加した場合にのみ、基板

および基板ホルダー部の4角形の形状を反映しているものと想像される。いずれの場合にしても、スパッタ法による薄膜形成過程に強磁場印加の効果が強く現れていることが分かる。

Happl=3T、O₂/Ar+O₂=2.2 % の条件で作製した Fe₅₀Si₅₀-O 薄膜の X 線回折パターンには、Fe₃O₄ 相の (220), (440) ピークが見られ、薄膜中で (110) 配向が生じていることが分かる。測定した磁化曲線から保磁力、残留磁化とも膜面垂直方向が大きく垂直磁気異方性を有していることが分かる。このような結晶配向と垂直磁気異方性の結果は前年度にも得られていたが、スパッタ条件にそれほど依らないことや再現性が確認された。垂直磁気異方性の起源として、まず Fe₃O₄ 相の結晶配向に注意しなければならないが、Fe₃O₄ は立方晶系であるため、結晶磁気異方性は垂直磁気異方性のような一軸異方性の起源となり得ない。次に Fe₃O₄ 結晶粒が強磁場印加により膜面垂直方向に伸びて成長していると仮定して、形状異方性を考えることができる。形状異方性によるものであれば、温度をパラメータとして磁化の自乗と異方性エネルギーをプロットすれば比例関係が得られることが期待されるが、磁化曲線を用いた解析でははっきりした結論は得られなかった。透過電子顕微鏡観察等の直接的な構造評価が必要である。

12年度の計画としては、(i) 薄膜試料に模様ができるメカニズムを検討することと (ii) 新規材料として注目に値する垂直磁気異方性を有する薄膜の創製に集中して研究を進める。スパッタ条件を最適化することによって一層大きな垂直磁気異方性が得られることが期待できる。

3. 主な研究成果の発表 (論文発表)

K. Watanabe, M. Motokawa, T. Onodera, K. Noto and T. Saito,
Advanced (Nb,Ti)₃Sn Superconducting Wire with Highly Strengthened and Good
Conductive CuNb Composite Stabilizer,
Mater. Sci. Forum 308-311 (1999) 561-566.

K. Watanabe, S. Awaji, A. Kuramochi, T. Fukase, K. Kimura and M. Motokawa,
Magnetization Properties for YBa₂Cu₃O₇ Bulk Fabricated by Seed Process in High
Magnetic Fields,
Adv. Supercond. XI, edited by N. Koshizuka and S. Tajima, Hong Kong 2 (1999) 653-
656.

K. Watanabe, S. Awaji, M. Motokawa, S. Iwasaki, K. Goto, N. Sadakata, T. Saito, K.
Watazawa, K. Jikihara and J. Sakuraba,
Cryocooled Large Bore Superconducting Magnet for a Hybrid Magnet System
Employing
Highly Strengthened (Nb,Ti)₃Sn Wires with CuNb Stabilizer,

IEEE Trans. Appl. Supercond., 9 (1999) 440-443.

三浦成人、渡辺和雄、淡路 智、本河光博、石川清一

高磁場ビッターコイル用大型高強度銀銅板の開発

日本金属学会誌 63 (1999) 1290-1294.

W.P. Chen, H. Maeda, K. Kakimoto, P.X. Zhang, K. Watanabe, M. Motokawa, H.Kumakura and K. Itoh,

Textured crystal growth of Bi(Pb)2212 bulk ceramics in high magnetic field,

J. Crystal Growth 204 (1999) 69-77

W.P. Chen, H. Maeda, K. Kakimoto, P.X. Zhang, K. Watanabe, M. Motokawa,

Processing of Ag-doped Bi2212 bulks in high magnetic fields; a strong correlation between degree of texture and field strength,

Physica C 320 (1999)96-100

H. Maeda,W.P. Chen, K. Kakimoto, P.X. ZhangK. Watanabe, M. Motokawa, H.Kitaguchi, H. Kumakura and K. Itoh,

Microstructure and properties of Bi2212 tapes and bulks grown in high magnetic field,

Advances in Superconductivity XI(1999) 823-826

W.P. Chen, H. Maeda, K. Kakimoto, P.X. Zhang, K. Watanabe and M. Motokawa,

Effect of Ag-doping on texture development of Bi2212 bulk ceramics in high magnetic field,

Journal of Low Temperature Physics 117 (1999) 771-775

W.P. Chen, H. Maeda, K. Watanabe, M. Motokawa, H. Kitaguchi, and H. Kumakura,

Microstructures and properties of Bi2212/Ag tapes grown in high magnetic fields,

Physica C 324 (1999) 172-176)

M. Tagami, M. Hamai, I. Mogi, K. Watanabe, and M. Motokawa.

Solidification of Levitating Water in a Gradient Strong Magnetic Fields.

J. Crystal Growth 203 (1999): 594-598.

Mogi, I., K. Watanabe, and M. Motokawa.

Effects of Magneto electropolymerization on Doping-Undoping Behavior of Polypyrrole.

Electrochemistry 67 (1999): 1051-1053.

Hamai, M., I. Mogi, M. Tagami, S. Awaji, K. Watanabe, and M. Motokawa.

Crystal Growth of Ammonium Chloride in Magnetic Levitation Conditions.

J. Crystal Growth 209 (2000): 1013-1017.

Mogi, I., K. Watanabe, and M. Motokawa.

Magnetic Field Effects on the Fractal Pattern Formation of Electrochemical Deposits.

Recent Res. Devel. Crystal Growth Res. 1 (1999): 1-11.

茂木巖

磁気電気化学における非線形現象.

Electrochemistry 67 (1999): 187-191.

茂木巖

強磁場下における金属のフラクタル成長.

固体物理 34 (1999): 193-198.

G. Sazaki, E. Nagatoshi, Y. Suzuki, S.D. Durbin, S. Miyashita, T. Nakada and H. Komatsu,

Solubility of tetragonal and orthorhombic lysozyme crystals under high pressure, J. Crystal Growth, 196, 204-209 (1999).

S. Yanagiya, G. Sazaki, S.D. Durbin, S. Miyashita, T. Nakada, H. Komatsu, K. Watanabe, and M. Motokawa,

Effect of a magnetic field on the orientation of hen egg-white lysozyme crystals, J. Crystal Growth, 196, 319-324 (1999).

G. Sazaki, S.D. Durbin, S. Miyashita, T. Ujihara, K. Nakajima, M. Motokawa, Magnetic damping of the temperature-driven convection in NaCl aqueous solution using a static and homogeneous field of 10 T,

Jpn. J. Appl. Phys., 38, L842-L844 (1999).

佐崎 元, 柳谷伸一郎, S.D. Durbin, 宮下 哲, 中田俊隆, 小松 啓, 中嶋一雄, 本河光博,

タンパク質の結晶化に及ぼす磁場効果, 表面科学, 20, 770-776 (1999).

S. Yanagiya, G. Sazaki, S.D. Durbin, S. Miyashita, K. Nakajima, H. Komatsu, K. Watanabe, M. Motokawa,

Effects of a magnetic field on the growth rate of tetragonal lysozyme crystals, J. Crystal Growth, 208, 645-650 (2000).

N. Kitamura, M. Makihara, M. Hamai, T. Sato, I. Mogi, S. Awaji, K. Watanabe and M. Motokawa,

Containerless melting of glass by magnetic levitation method, Jpn. J. Appl. Phys. 39(2000)L324-L326.

S. Mitani, H.L. Bai, Z.J. Wang, H. Fujimori and M. Motokawa

Physical vapor deposition in a high magnetic field

Proc. 3rd Int. Symp. Electromagnetic Processing of Materials (EPM2000), pp. 630-634, Nagoya 2000.