

養成技術者の研究・研修成果等

1. 養成技術者氏名: 牧 祥

2. 養成カリキュラム名: 超伝導マグネットの磁気浮上を利用した擬似宇宙環境の創生と構造生物学への応用

3. 養成カリキュラムの達成状況

1. タンパク質結晶成長に及ぼす磁化力の効果

磁化力を印加しつつ、塩化ガドリニウムを結晶化剤として用いてリゾチームを結晶化すると、磁気アルキメデス浮上によって気液界面でのみ結晶が析出する効果を発見し、これについては平成14年度に特許出願した。15年度は、そのメカニズムについて考察を深め、溶液と結晶の磁性の違いによって起こる現象であることを突き止めた。それらの結果はJ. Crystal Growthに投稿し、2004年2月に掲載された。よって養成カリキュラムの目標は十分達成されたものと思われる。

2. 放射光を利用した結晶の品質評価

磁気アルキメデス浮上によって気液界面で成長した結晶をSPring-8の白色X線トポグラフによって評価したところ、構造的に極めて優れた結晶であることが判明した。これについては容器壁の影響がない状態で結晶が成長した結果であると思われる。この理由についても上記の論文で説明している。

また15年度から、有機物であるゼラチン中で無機物の二クロム酸カリウムを結晶成長させ、磁場、および磁化力による影響についても研究を進め出した。この結晶についてもSPring-8の白色X線トポグラフによる品質評価を行った。その結果、磁場の有無による明確な違いが認められ、現在、論文を執筆中である。よって養成カリキュラムの進捗状況は良好である。

3. 磁化力を正確に計測する三次元磁化力センサーの開発

自分は派遣当初から、磁化力を正確に、かつ三次元的に計測するセンサーの開発をおこなっている。平成14年度にはセンサーの構造原理と試作機の開発まで成功し、簡単な実験結果を元に特許出願を完了させたが、15年度はさらに精密な実験を行って、より満足できる精度の結果を得た。この結果を追加して、15年度に国内優先権主張の出願を完了した。現在、磁化力センサーの論文を執筆中である。よって養成カリキュラムの進捗状況は良好であるといえる。

4. 磁化力場下での非磁性流体の流動解析

磁化力が重力の効果を相殺し、擬似的な無重力環境を創生することができることを利用すれば、わざわざ宇宙に行かなくても、優れた機能材料の開発が可能になると期待されている。このとき対流の効果は品質に決定的な影響を与える。そこで数値解析によって磁化力による対流の抑制、促進などの流動特性を調べている。平成15年度には、硝酸ガドリニウム水溶液を使った常磁性液体の磁化力対流の対流実験と数値計算結果をAIChE J. に投稿した。また15年度には、軸対称性のない磁化力分布を計算できるプログラムを開発し、中心軸上に限定しないモデルで磁化力の数値計算を行

うことができるようになった。この磁場のプログラムと磁化力対流の計算プログラムを組み合わせ、さまざまなモデルの磁化力対流計算を行っている。そうして得られた数値解析結果について J. Appl. Phys. に投稿した。そのほかにも膨大な数値解析を継続中であり、養成カリキュラムの進捗状況は良好であるといえる。

4. 成果

< タンパク質結晶成長に及ぼす磁化力の効果 >

高品質タンパク質の結晶化プロセスの確立はポストゲノムの生命工学分野において非常に大切なテーマである。自分はタンパク質の結晶化に磁化力を印加し、高品質化を図る研究を行っている。本実験に必要な観察装置や測定機器は、全て設計・開発段階から自身で行い、強磁場下でも温度コントロールが可能で、また結晶成長過程の「その場観察」ができる装置を開発した。この装置については平成 14 年度に特許出願を完了しており、これを使って、これまで観察することが難しかった狭い超伝導マグネットボア内部のその場観察実験を行っている。平成 14 年度末から 15 年度中頃までは、卵白リゾチームを用いた結晶成長プロセスの研究を行った。結晶化剤には、強い常磁性特性をもつ塩化ガドリニウムを使用したが、リゾチームの結晶化剤としてこの塩を使用した報告はこれまでなされていない。この結晶化条件で 3~4 テスラ程度の磁場を印加しながら結晶化させると、磁化力によって結晶が気液界面に浮上した状態で析出させることに成功した。そして結晶成長過程は CCD カメラで記録した。こうして生成した結晶表面を顕微鏡観察した結果、傷のある結晶はほとんど見られなかった。さらに SPring-8 の白色 X 線トポグラフを利用して結晶の品質評価実験を行ったが、従来の方法で作った結晶よりもはるかにラウエ斑点が明瞭で、歪みのほとんどない高品質結晶であることが判明した。界面で浮上させて生成した結晶は、サンプル容器に接触せず成長できるため、容器壁の影響が全くない。これまで非磁性物質を磁化力で浮上させる方法は、高価なハイブリッドマグネットを使用したものであった。しかし莫大なコストがかかり実用化には程遠い。しかし本実験方法では、たかだか 3~4 テスラで十分である。この磁化力による磁気浮上を利用すれば高品質な結晶を大量にかつ安定的に生産することも可能だ。また超伝導マグネットの新しい利用法の開拓にもつながる研究成果とも考えている。以上の成果は、国際的学術雑誌である J. Crystal Growth に投稿し、2004 年 2 月に掲載された。また産総研の所内報でもこの成果が取り上げられた。

< 放射光を利用した結晶の構造解析の方法 >

磁気アルキメデス浮上によって気液界面で成長した結晶を SPring-8 の白色 X 線トポグラフによって結晶評価する研究を行っている。平成 14 年度から 15 年度前半はリゾチームの浮上結晶の評価を行ってきたが、15 年度後半からは、有機物であるゼラチン中で無機物の二クロム酸カリウムの結晶を成長させたときの磁化力の効果について研究を開始した。磁場を印加して生成した二クロム酸カリウム結晶を SPring-8 の白色 X 線トポグラフを利用して結晶評価実験を行ったところ、結晶のゆがみや欠陥などに、磁場の有無によって明確な違いが確認された。

< 磁化力を正確に計測する三次元磁化力センサーの開発 >

磁化力を正確に計測するセンサーはまだ開発されていない。それは磁化力が磁束密度と磁束密度の勾配の積に比例するため、通常のガウスメーターでは原理的に計測できないためである。また磁化力は弱い力である。そのためヘリウムフリータイプの超伝導マグネットが普及し、高磁場環境を比較的容易に発生できるようになるまで、ほとんど注目されなかった。しかし、磁化力によって結晶の品質向上を行ったり、対流を制御したり、重力を相殺させて地上でも擬似的な無重力環境を創生するなど、興味深いテーマが次々報告されている昨今、定量的に磁化力を計測するセンサーの開発はどうしても必要であろう。自分は、派遣された当初から、磁化力を正確に、かつ、もし可能な

らば三次元的に計測できるセンサーの開発を目指してきた。そして複数のガウスメーターを組み合わせれば、理論的に磁化力を測定できる構造を考案し、平成 14 年度にセンサーの構造原理と試作機の開発まで成功した。それについては平成 14 年度に特許出願を完了した。平成 15 年度には、精密な実験を行い、より満足できる精度の結果を得た。この実験結果を元に、平成 15 年にこの特許の国内優先権主張の出願を完了した。

< 磁化力場下での非磁性流体の流動解析 >

磁化力が重力の効果を相殺し、擬似的な無重力環境を創生することができることを利用すれば、わざわざ宇宙に行かなくても、優れた機能材料の開発が可能になると期待されている。このとき対流の効果、特に対流を減少・抑制できる効果は品質に決定的な影響を与える。そこで数値解析によって磁化力対流の流動特性を調べている。平成 15 年度には、硝酸ガドリニウム水溶液を使った常磁性液体の磁化力対流の対流実験と数値計算結果を AIChE J. に投稿した。投稿した論文では、常磁性流体の数値計算を行った最初の研究であるとともに、過去に Braithwaite らが 1991 年に Nature に報告し、磁化力の論文では必ずといっていいほど引用される論文の限界を指摘する内容となった。また、流動解析の研究における平成 15 年度の成果の一つとして、軸対称性のない磁化力分布を計算できるプログラムを開発したことがある。これによって、中心軸上以外の任意の点での磁化力の数値計算を行うことができるようになった。このプログラムは完全に自分一人で組み上げたオリジナルのプログラムで、現在さまざまなモデルの数値計算を実行中である。この計算プログラムを用いた成果の一つとしては、磁化力の半径方向成分をもっと積極的に利用するための方法の新提案がある。

5 . 成果の対外的発表等

(1) 論文発表 (論文掲載済、または査読済を対象。) 3 件

1. S. Maki, T. Tagawa, and H. Ozoe, *Exp. Thermal and Fluid Science*, 27, 891 (2003).
2. S. Maki, Y. Oda, and M. Ataka, *J. Crystal Growth*, 261, 557 (2004)
3. S. Maki, and M. Ataka, *J. Appl. Phys.* (in revision).

(2) 口頭発表 (発表済を対象) 1 件

牧 祥、安宅 光雄、日本結晶成長学会第 33 回結晶成長国内会議, 731aB2. 予稿の掲載は日本結晶成長学会誌. **30** (3), 77 (2003).

(3) 特許等の出願件数 1 件