

「磁場を用いた反磁性流体の熱対流制御」

Magnetically Controlled Diamagnetic Fluid Convection

46114 岡野貴之 高木・野原研究室

【緒言】

結晶成長や熱輸送において物質の移動や流動の制御は重要な役割を果たす。磁場は物質に非接触で力を作用させることができるため、物質移動の制御手法としての利用が検討されている。既に実用化されている例もあり、例えば大直径シリコンの結晶成長においては、磁場印加によって融液の流れを抑制し坩堝からの酸素混入量をコントロールしている。これは導電性物質中に生じるローレンツ力の効果による流体制御の例である。ところで非導電性物質の場合には、勾配磁場下において物質に作用する磁気力を利用することで、流れの制御ができるケースが知られている。空気の熱対流制御や、水中への酸素溶解加速、蒸発の促進などの例があるが、いずれも常磁性物質が関与する系においてのみ観測されている。これは、常磁性体の磁化率が大きく、また、キュリー則に従い温度に反比例して変化するため、系内に濃度差や温度差のある場合に体積磁化率の勾配が形成され、作用する磁気力に大きな差が生じやすいためである。これに対して、反磁性流体のみで構成される系の場合、体積磁化率も、その温度依存性も小さいため、磁場による流れの制御は検討されてこなかった。しかし、反磁性流体は、結晶成長を始めとする多くの材料プロセスや物理化学プロセスに関与し、重要な役割を果たしており、磁場によりその流れを制御できれば、工学的な利用価値が高いと考えられる。特に水は様々な溶液のベースとなる反磁性物質で、それについて理解することは重要である。加えて、最近、磁場中で融液からの結晶成長を行い高品質のたんぱく質結晶を得た実験があるが、これは単なる有機クラスターの配向効果であるのか、または、対流の抑制効果であるのか、反磁性物質流の磁場効果がよく調べられていないため、詳細については未だによくわかっていない。そこで本研究では、反磁性物質の流れに対する磁場の影響を評価し、さらに流れの自在な制御に関する知見を集積することを目的とした。

【原理と実験方法】

本研究で用いた実験装置の模式図を Fig.1 に示す。対象とする反磁性流体の純水は、水平に配置した2枚の平行平板(Fig. 1 中の a, c)とリング状のテフロン(同 b)に囲まれた直径 40 mm, 厚み 3 mm($T_1=25.0^\circ\text{C}$ の時)または 6 mm(同 5.0°C の時)の円筒状空間に閉じ込める。上板直上に温度制御した冷却水を循環させ、下板をヒーター(Fig. 1 中の d)で一様に加熱することで、垂直方向に温度勾配が形成され発生するベナール対流を観測対象とした。このような系では、形成される温度勾配が小さいうちは伝導により熱が運ばれるが、上下板の温度差がある閾値を超えると対流が発生する。本研究では、この実験系を勾配磁場下に置き、純水に対して磁気力を作用させることで、熱対流が制御できるか、について検討した。

純水の体積磁化率は Fig. 2 に示すように、温度に依存してわずかではあるが変化することが知られている。このため、純水中に温度差ができると、密度差に起因する浮力に加えて、流体の上面と下面で磁気力にも差が生じる。この性質を利用すれば、磁場による熱対

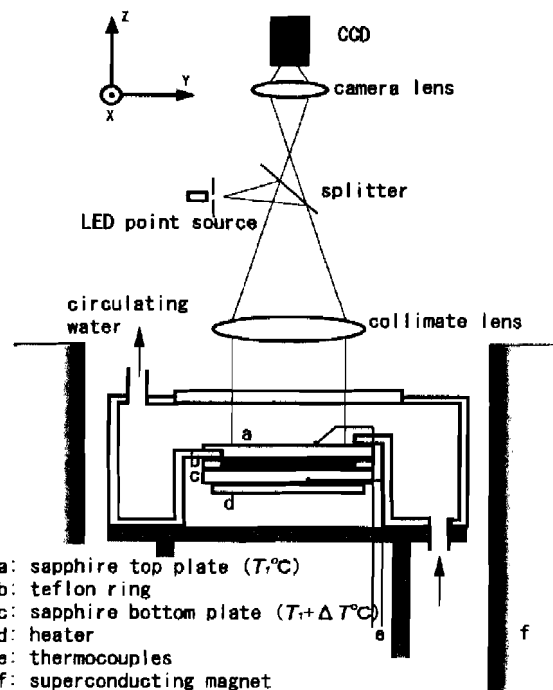


Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

流の制御が可能となると考えられる。 $T_1=25.0^\circ\text{C}$ とした場合、低温（上面）の純水に作用する磁気力が、高温の純水に作用するものに比べ大きくなるため、磁気力を上向きに与えた場合には対流開始が抑制、下向きに与えた場合には促進されると予想できる。また、純水の体積磁化率が 15°C 近傍で極小を取ることから、 $T_1=5.0^\circ\text{C}$ のように低温の条件では、磁場効果の表れ方が $T_1=25.0^\circ\text{C}$ の場合と比べ逆転すると考えられる。実際に、この程度の磁化率変化が熱対流開始温度差に影響を与えうるのかを実験により検証した。

実験では、対流開始温度測定を熱伝達評価により、また、空間的な対流挙動の評価をシャドウグラフ法による可視化によって実施した。熱伝達評価では、上下板の温度差 ΔT を熱電対 (Fig. 1 の e) により計測し、ヒーターの出力に対して、平衡に到達した際の温度差 ΔT をプロットする。対流が発生すると、熱伝達量が増加するため、この図の傾きが小さくなる。傾きが変わる温度差が対流開始温度差になる (Fig. 3 参照)。対流の可視化は、暖かい上昇流と冷たい下降流が周期的に形成されることで生ずる。空間的な温度差による屈折率の違いから、流体に平行光線を入れると、投影像に明暗が生じることで評価できる。入射光は暖かい上昇流から冷たい下降流へと曲げられるので、下降流は明るく見え、上昇流は暗く見える。これによって、2次元面内での対流挙動に関する情報が得られる。実験は、 $T_1=25.0^\circ\text{C}$ および 5.0°C のもと、各々、無磁場、及び、勾配磁場下 ($\pm 417 \text{ T}^2/\text{m}$) において行った。

【結果 1: ΔT_c 評価】

熱伝達評価の結果を Fig. 3 に示す。ヒーター出力に対して温度差をプロットした図の傾きに変化が見られる点から、対流の開始点を決定した。予想されたように、体積磁化率のわずかな温度変化によって磁場効果が表れた。 $T_1=25^\circ\text{C}$ の時、流体に対して磁気力が上向きに作用する場合、対流が抑制され、下向きの場合、促進されている。これに対して、 $T_1=5^\circ\text{C}$ の場合には、実際に、上向き磁気力で対流促進、下向きで抑制となることが確認された。これによって、従来は観測されていなかった磁場による反磁性流体の熱対流制御が、確かに、微小な体積磁化率の温度変化を利用して可能になることを示すことができた。

【結果 2: 可視評価】

$T_1=25^\circ\text{C}$ の時のシャドウグラフ法による可視化の結果を Fig. 4 に示す。2次元での対流挙動の可視化に成功しており、対流開始温度に対する磁場影響も、熱伝達評価と一致した傾向が観測された。 $T_1=5^\circ\text{C}$ での可視化にも成功したがここでは省略する。また、Fig. 5 に示すように、無磁場下

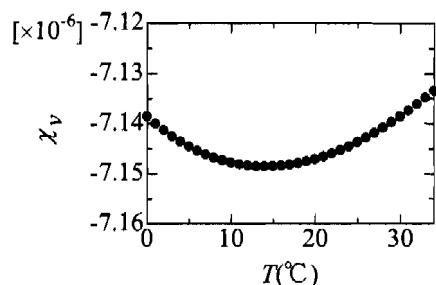


Fig.2 Temperature dependence of χ_v

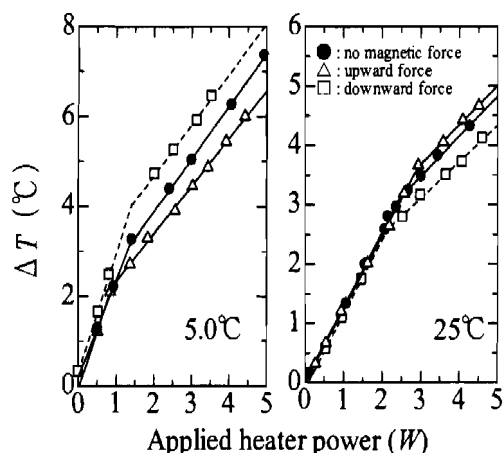


Fig.3 Evaluations of the onset of convection

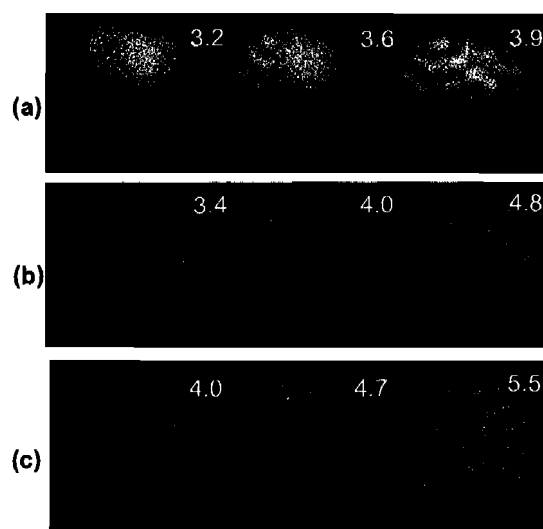


Fig.4 Shadow graph images of convection pattern (a)under downward force, (b)without field, (c)under upward force. The number on upper right of each images is the value of $\Delta T(^\circ\text{C})$.

で対流を開始させた後、磁場を印加することで、一度発生した対流が抑制される磁場スイッチングの効果を観測した。この現象は、試料系内の平均的な情報を得る熱伝達評価では観測できないもので、局所的な情報を得る可視化に成功することによってはじめて可能になったといえる。

【考察】

本研究で観測された磁気力による熱対流の制御は、定性的には前述の原理に基づき理解できる。ベナール対流における対流発生は、無次元量であるレイリー数 Ra により記述されることから、これを考慮することで定量的な評価を行なった。レイリー数は、 $Ra = g \alpha d^3 \Delta T / (\kappa \nu)$ と表される。ここで g は重力加速度、 α は熱膨張率、 d は流体の厚み、 ΔT は上下面の温度差、 κ は熱拡散率、 ν は動粘性率である。理論から $Ra = 1708$ で対流が発生することが知られている。 $T_1 = 25^\circ\text{C}$ で無磁場中の実験では、 Ra の平均値は 1671 であったので、本研究における実験系は、対流発生を適切に評価できていると考えられる。観測された熱対流に対する磁場影響が、実際に磁気力に起因するものであることを定量的に評価するため、レイリー数に磁気力の影響を取り込み、補正した ($Ra_m = \{g\alpha + (\alpha g_m + \alpha_m g_m)\} d^3 \Delta T / (\kappa \nu)$)。 (g_m は磁気力、 α_m は体積磁化率の単位温度当りの変化を意味する。) これを用いて実験結果を評価したところ、 $T_1 = 25^\circ\text{C}$ において磁場下で対流発生が観測された時の Ra_m の平均値は、無磁場の場合のものと同程度になった (table 1 参照)。これによって、純水の熱対流に対する磁気力の影響を定量的に確認できたと考えている。なお、 $T_1 = 5^\circ\text{C}$ においては無磁場における Ra 自体が理論に合わない。これは、この温度領域では、純水の各種物性値の温度変化が一定でないことに起因すると考えられる。



Fig. 5 Control of conduction-convection transition by magnetic fields. Left: onset of convection without the field, Center: suppression of convection by applying the field, Right: recovery of convection by removing the field

25°C	ΔT_c			Ave.	Ra	Ra_m
$F_m : \downarrow$	2.87	2.65	2.87	2.79	1367	1551
No F_m	3.23	3.13	3.45	3.27	1671	-
$F_m : \uparrow$	3.70	3.69	3.66	3.68	1818	1572

Table 1 ΔT_c and Ra , $T_1 = 25^\circ\text{C}$, $d = 3$ mm

5°C	ΔT_c			Ave.	Ra
	4.10	4.66	4.91	4.56	712
	3.12	3.11	3.46	3.23	587
	2.20	2.84	2.88	2.64	459

Table 2 ΔT_c and Ra , $T_1 = 5^\circ\text{C}$, $d = 6$ mm

【まとめ・結論】

本研究では、磁場による反磁性物質の流れの自在な制御に関する知見を集積することを目指し、純水の熱対流に対する磁場影響を、熱伝達・光学的可視化の両面から評価した。体積磁化率の温度依存性から、対流開始温度に対し磁気力の影響が現れること、実験温度が $T_1 = 25^\circ\text{C}$ と 5°C の場合に磁場影響が逆転することを見出した。 $T_1 = 25^\circ\text{C}$ の場合には、対流の可視化、磁場影響の定量的な評価にも成功した。これにより、純水が液体である温度領域においては、磁場が流体の振る舞いに与える影響を理解できたと考えられる。また、磁場は一度発生した流れを止めることにも有効であることがわかった。このことは材料プロセスにおいて流れを止めたい時にも、また逆に作り出したい時にも、磁場の利用が有効であることを示唆し、磁場による流れのオン・オフスイッチングに応用できると期待される。以上のように、本研究によって反磁性物質である純水についてその熱対流に対する磁場効果をほぼ明らかにすることができた。これより先は、ここで得られた知見を踏まえ、実際の材料プロセスに磁場効果がどのように反映されているのか、あるいは、どのように磁場制御を設計するのかを検討する段階に進むことができたとと言える。

【参考文献】 H.Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. 94, 144501 (2005)