燃焼とガス流への磁場効果の実験とシミュレーション

Experiment and Simulation of Magnetic Curtain

上野照剛・江口浩之・岩坂正和

九州大学工学部電子工学科, 福岡市東区箱崎 6-10-1 (☎812)

S. Ueno, H. Eguchi and M. Iwasaka

Dept. of Electronics, Kyushu Univ., Hakozaki, Fukuoka 812

We have observed a phenomenon in which candle flames are pressed down by magnetic fields of high intensities. We have also observed a phenomenon in which flow of gases such as carbon dioxide and oxygen is blocked by magnetic fields. A model called a "magnetic curtain" has been introduced to explain these phenomena. It is assumed that the magnetic curtain is a wall of air caused by magnetic fields. We have demonstrated that a candle flame can be quenched by a magnetic field, since a magnetic curtain intercepts oxygen.

This study focuses on the mechanism of the magnetic curtain. A collision gas model based on molecular dynamics is proposed. Computer simulation shows magnetic fields blocking the gas flow.

To verify the validity of the model, a magnetic curtain was produced by means of an 8-T superconducting magnet, and the gas pressure in the bore of the magnet was measured by using a manometer.

Key words: gradient magnetic fields, molecular dynamics, paramagnetic oxygen, computer simulation

1. はじめに

磁場と代謝との関わり合いについての研究に関連して、我々は先に、空気中の燃焼反応やガスの流れが、1~2 T, 50~100 T/m オーダの磁場で顕著な影響を受けることを観測した¹⁾。この現象に対して、磁場と常磁性酸素との相互作用により、大気中に何らかの障壁が形成されるものと考え、それを磁気による酸素壁、または磁気カーテンと呼ぶことにした。磁気カーテンにより、火炎の形状が変化したり、磁気カーテンを積極的に利用することにより、燃焼中の火炎を消すことができた^{2), 3)}。また、磁気カーテンと火炎の位置関係で火炎の形状も発光スペクトル強度も容易に変化することを示した²⁾。例えば磁極端での火炎の発光強度は勾配磁場によって増加し、その増加の割合は磁場強度と磁場勾配の積に比例する。さらに、窒素雰囲気中でのガス流実験から磁気カーテンは酸素の存在で形成されることを実証した⁴⁾。

以上のような観測結果をもとに、我々は先に、気体分子運動論に基づいたモデルを導入し、勾配磁場中のガス流の計算機シミュレーションを行い窒素ガス流が磁気カーテン中で阻止されるようすを調べた^{4), 5)}。しかし、そのシミュレーションにおいては、実際の実験で顕著な影響が見られた磁気力よりもかなり大きな磁気力を与えなければガス流の変化が得られなかった。そこで今回は磁気力の作用の処理を改良して再度シミュレーションを行い、本当に我々の導入したモデルによって磁気カーテンの説明が可能なのかどうかを検討した。また、超伝導マグネット内での燃焼実験を行い、モデルの有効性を検証した。

2.1 磁気カーテン

Fig. 1 のようなくさび形の磁極間にガスを流すと、磁場印加前は磁極間を通り抜けるが、磁場印加後は磁極間に何らかの障壁が形成され、ガス流がブロックされる。この現象は、空気中に存在する酸素が常磁性であるので、勾配磁場との相互作用により磁極間に何らかの障壁が形成されるためであると考えられる。我々はこの障壁を磁気カーテン (magnetic curtain) と呼ぶことにした。

磁気カーテンの形成において酸素が重要な役割を果たしているということを証明するために、我々は実験雰囲気中の酸素濃度を变化させてガス流の遮断現象を観測した。くさび形磁極の上方から二酸化炭素を向下きに流して磁極の下方でその濃度を測定し、二酸化炭素の濃度が、磁場を印加することによって変化するかどうかを調

Fig. 1 Blocking of the gas flow in gradient magnetic fields.

Fig. 2 Gas flow experiment: (a) oxygen poor atmosphere; (b) air atmosphere.

べた。Fig. 2 にその結果を示した。酸素濃度の低い (a) では、磁場を印加しても変化は見られないが、通常の大気中での酸素濃度 (b) では明らかに二酸化炭素の濃度は低下している⁴⁾。これは酸素と勾配磁場により磁極間に磁気カーテンが形成され、二酸化炭素の流れが阻止されて磁極の下方まで到達しなくなったためであると考えられる。この実験結果よりやはり磁気カーテンの形成には酸素が決定的な役割を果たしていることが明らかになった。

2.2 モデル化とシミュレーション

常温の空気 1 cm^3 中には約 2.5×10^{19} 個もの分子が存在する。そのすべての動きを追跡するには膨大な計算が必要である。そこで、我々は気体分子運動論に基づく簡単なモデルを導入し、勾配磁場中での窒素分子の軌跡をコンピュータシミュレーションにより求めた。気体分子運動論によると、温度や体積などの値を定めるとその領域での気体分子の状態が決まる。我々の導入したモデルは、その中を動いていく分子の軌跡を求めようとするものである。

実際に衝突による速度変化を計算して動きを求めるのは、追跡している分子だけで、他の分子は考えない。ただし、追跡している分子が衝突する時には、その相手の速度を気体分子運動論に従う計算式によって与えている。

気体分子運動論によると、各気体分子は平均自由行程 L だけ進むごとに衝突を繰り返して動いていくことになるが、ここでは平均自由行程 L と平均の速度 $\bar{u}$ から、

$$\tau = \frac{L}{\bar{u}} \quad (1)$$

として得られる τ (衝突単位時間と呼ぶことにする) を固定して、各分子は τ 秒ごとに衝突するものとした。なお τ は、酸素分子では約 $1.6 \times 10^{-10} \text{ s}$ 、窒素分子では約

Fig. 3 Distribution of magnetic force.

$1.4 \times 10^{-10} \text{ s}$ となる。また、空気を窒素 80%、酸素 20% の混合気体と考え、衝突の相手はこの割合に従って選んだ。

酸素は常磁性であり窒素は反磁性であるから、酸素は磁場の強い場所に集まろうとし、窒素は磁場の強い場所を避けようとするはずである。しかし、磁化率は酸素の方が窒素よりも 3 桁程度大きいので、ここでは窒素に働く磁気力は考慮していない。酸素分子には次式のような磁気力が働く。

$$F = \chi \frac{B}{\mu_0} \frac{\partial B}{\partial z} \quad (2)$$

ここに χ は酸素分子のモル磁化率 (3449×10^{-6} [CGS]), μ_0 は真空の透磁率, B は磁束密度である。Fig. 3 にシミュレーションにおいて用いた磁気力の概形を示す。この磁気力のため、酸素分子は磁場勾配の中心に向かう向きに速度の偏りを持つはずである。また窒素分子も、酸素分子と衝突することによって速度の偏りを持つことが考えられる。以前のシミュレーションではこのことは考慮していなかった。衝突のうちの 8 割が窒素分子との衝突であるから、窒素分子に速度の偏りを持たせることでかなりの変化が期待できる。しかし、本シミュレーションでは領域中のすべての分子を追跡しているわけではなく、窒素分子の速度の偏りを見積るのには困難である。そこで、磁気力の影響を窒素分子の分も含めて酸素分子に加えることを試みた。

酸素分子の速度は、磁気力によるポテンシャルエネルギーに従って分布していると考え、つまり、ポテンシャルエネルギー U がすべて運動エネルギーに変わるとすると、

$$v = \sqrt{\frac{2U}{m}} \quad (3)$$

これを磁気力による速度の偏りとして酸素分子の速度に加えた。

Fig. 4 Trajectories of nitrogen molecules in gradient magnetic fields at various maximal magnetic forces ($F_{\max}$).

シミュレーション全体の手順は以下のようなものである。まずスタートラインに速度を与えた窒素分子を10個置き、 τ 秒間その速度で動かす。 τ 秒たったら衝突するはずであるから、衝突相手を乱数によって窒素か酸素か決定する。衝突相手の速度をランダムに与え、酸素分子の場合はそれに磁気力による速度の偏りを加える。完全弾性衝突による速度変化を計算して衝突後の速度を求める。追跡している分子は、ガス流実験で流している中の10個であるから、流速を加える。

以上のような手順で、500万回衝突する間（約0.6 mS）の軌跡を求めた。また、ガス流の変化を評価するために、場所による流れ方向の速度分布を調べた。

2.3 結果および考察

Fig. 4 にシミュレーション結果を示した。左側の曲線は、場所による流れ方向（ z 方向）の速度成分の平均値を表している。これは10個の分子が衝突するたびにその場所でのデータとして加えた結果である。上端と下端で大きな値を示しているのは、サンプル数（その場所での衝突数）が少ないためである。この結果を見ると、 $F_{\max} = 10^{-21}$ N では明らかに流れが遮断されている。実験で

は、磁場強度 1.5 T、磁場勾配 150 T/m でガス流の遮断が観測された。(2) 式からこの磁場で酸素に働く磁気力を計算すると、25°C で 1 mol 当たり 7.9 N となる。これをアボガドロ数で割って 1 分子当たりの力に換算すると、 1.3×10^{-23} N となる。実験とシミュレーションでは1桁から2桁の差がみられる。本シミュレーションでは平均自由行程がどこでも一定であるとしているが、平均自由行程は粒子密度によって変わるので、実際は磁極の付近では小さくなっていると考えられる。また、シミュレーションの領域が縦 0.8 mm と実際の実験条件よりも2桁ほど狭い。これらを改良すればさらに差は縮まるであろう。厳密には言えないが、このシミュレーション結果から考えると、磁気カーテンは常磁性体である酸素に働く磁気力の結果として説明できるのではないかと考えられる。

3. 磁気カーテン近傍での火炎燃焼実験

3.1 実験方法

ここでは磁気カーテンの詳細な物理的特性を明らかにするために、超伝導マグネットのボア内部での燃焼実験

Fig. 5 Experiments producing a magnetic curtain in a superconducting magnet: (a) candle flames in the bore of the magnet; (b) spatial distributions of magnetic fields and pressure.

および圧力測定実験を行った。

水平型超電導マグネットのボアの中心部 (0 mm)、磁気力最大地点近傍 (約 85 mm) およびその外側 (100 mm) の 3 箇所 に高さ 20~30 mm のろうそくを設置して燃焼させ、その形状変化を観察した。

マグネットのボア内の圧力測定には差圧式マノメータを用い、水平方向の圧力分布を測定した。

3.2 結果および考察

マグネットのボア内における火炎の形状変化を Fig. 5 (a) に示す。ボアの中心部 (0 mm) での火炎が直立しているのに対し、磁気力が大きな地点すなわち、磁気カーテン近傍ではマグネットの外側へ火炎が横転した。この火炎をボアの外側から観測したようすを Fig. 6 に示す。

Fig. 6 Appearances of candle flames from outside the bore: (1) in the center of bore (0 mm); (2) in the magnetic curtain (85 mm).

磁気力最大地点近傍 (約 85 mm) での火炎は極端に縮小し、青色を示した後、消炎する場合が見られた。一方、ボアの中心部 (0 mm) での火炎は、20 秒程度放置しても殆ど形状に変化はなく、消炎には至らなかった。

マグネットのボア内の圧力測定結果を Fig. 5(b) に示す。マグネット中心部において圧力は最大値を示した。それに対して、磁気力最大地点すなわち、磁気カーテン近傍では、中心よりも低い圧力を示した。

この事実、磁気カーテン付近での火炎の縮小および燃焼軸の傾きが、圧力分布の影響を直接受けたものでないことを示唆している。すなわち火炎形状変化における圧力の影響は小さく、それよりも常磁性酸素が形成する磁気カーテンが火炎に及ぼす作用が大きいと言える。

謝 辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金一般研究 (B)04452210 によった。

文 献

- 1) 上野照剛, 原田耕介: 日本応用磁気学会誌, **11**, 445 (1987).
- 2) S. Ueno: *J. Appl. Phys.*, **64**, 6030 (1988).
- 3) S. Ueno: *J. Appl. Phys.*, **65**, 1243 (1989).
- 4) S. Ueno and M. Iwasaka: *J. Appl. Phys.*, **67**, 5901 (1990).
- 5) 上野照剛, 岩坂正和: 日本応用磁気学会誌, **14**, 407 (1990).
- 6) 上野照剛, 田爪國利, 江口浩之: 日本応用磁気学会誌, **16**, 566 (1992).

1992 年 11 月 18 日受理, 1992 年 12 月 22 日採録