溶存酸素の輸送過程に対する磁場効果

Dynamic Behavior of Dissolved Oxygen Molecules in Strong Magnetic Fields

上野照剛・岩坂正和・古川 剛

東京大学医学部医用電子研究施設基礎工学部門, 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113)

S. Ueno, M. Iwasaka, and G. Furukawa

Institute of Medical Electronics, Faculty of Medicine, Univ. of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

We investigated the effect of high-gradient magnetic fields of up to 8 T on the process of diffusion of dissolved oxygen molecules in water. A cylindrical water chamber was filled with water containing 8-9 mg/l of dissolved oxygen. We continuously injected oxygen-rich water into the inlet of the water chamber, and measured changes in the dissolved oxygen concentration in water taken from the outlet of the chamber. When the water chamber was exposed to magnetic fields with a distribution of 4 T-8 T-4 T, diffusion of dissolved oxygen molecules was accelerated. When the water chamber was exposed to magnetic fields with a distribution of 8 T-0.5 T, diffusion of dissolved oxygen molecules was also accelerated initially. However, we observed that the flow rate of dissolved oxygen molecules was inhibited when the dissolved oxygen concentration in the chamber reached a threshold level.

Key words: dissolved oxygen, diffusion, magnetic field, gradient magnetic field, biomagnetic effect

1. はじめに

常磁性物質である溶存酸素の磁場中での挙動を知ることは、生体に対する磁場の影響を考える上で、また、広く新しい磁気応用の可能性を探る上でも重要である。

我々は先に溶存酸素の局所的濃度分布が磁場によって変化を受けるか否かについて実験を行った。その結果 1 T, 10 T/m の勾配磁場のもとでは溶存酸素の移動は直接的には生じないが¹⁾、最大 8 T の磁場において溶存酸素測定電極を用いた溶存酸素濃度測定を行った結果、濃度分布の変化を認めた^{2), 3)}。

しかし、溶存酸素電極における電気化学反応系などへの磁場影響の可能性があることも指摘されたため、溶存酸素測定電極を磁場に暴露することを避け、最大 8 T の強磁場にて 1 時間暴露した水槽を磁場外に取り出し、水槽の中の水を 6 枚の仕切板で七つの部屋に分割して溶存酸素濃度を測定した⁴⁾。その結果、大気中の酸素分圧のもとでの溶存酸素濃度である約 8~9 mg/l の水を 8 T 磁場に暴露しても濃度変化は見られなかったが、酸素ガスを水中に導入して溶存酸素濃度を約 12 mg/l 以上にした場合、8 T 磁場において有意な濃度変化が見られた。水中の平均的な溶存酸素濃度を約 16~20 mg/l 設定したときの溶存酸素の再分布について再実験を行い、水槽の両端における溶存酸素濃度で規格化して示したものが Fig. 1 である。

Fig. 1 Redistribution of the dissolved oxygen concentration under magnetic fields of up to 8 T. The horizontal axis shows the section numbers of compartments in a water chamber.

Fig. 2 Magnetic forces acting on 1 mol of oxygen molecules.

我々が用いた超伝導マグネットが発生する磁場中において、1 mol の酸素分子の集団が受ける磁気力を Fig. 2 に示す。磁化率 χ の物質に作用する磁気力は χ と磁場と磁場勾配の積に比例する。仮に常磁性の球が勾配磁場中にある場合、Fig. 2 に示すような動きを見ることが考えられる。

本研究では、高濃度の溶存酸素を含む水が低濃度の溶存酸素を含む水中にて拡散する過程への最大 8 T 磁場の影響について調べた。

2. 実験方法

実験に用いた超伝導マグネットのボア径は 100 mm, 長さは

Fig. 3 Experimental set-up for measuring the process of diffusion of oxygen molecules dissolved in water.

700 mm である。

Fig. 3 に中心磁場 8 T のときの磁場分布および実験方法の概要を示す。z 軸は超伝導マグネットのボアの軸方向の座標である。

フラスコ中（始点）の水をシリコン・チューブ（内径 1 mm および 2.5 mm）を通して円筒型の水槽に導いた。フラスコと円筒型的水槽の間には送液ポンプ（しごきポンプ）が介在しており、毎秒約 2.5 ml で円筒型水槽の方向へ水を送った。円筒型水槽を出た水は再びチューブを通して溶存酸素センサ電極（終点）へと導かれた。この実験系において、円筒型水槽を最大 8 T の磁場に暴露した場合および暴露しない場合の、終点における水の溶存酸素濃度を測定した。

本実験で使用した円筒型水槽とはクロマトグラフィー用のカラム容器であり、内径は 17 mm、長さは 340 mm である。あらかじめ円筒型水槽に低濃度酸素水（約 8~9 mg/l）を封入し、低濃度酸素水（約 8~9 mg/l）を入れたフラスコ（始点）からすべての流路に水を流して平衡化した後、フラスコを高濃度酸素水を入れたものへ変更した。この時点から後、溶存酸素センサ電極（終点）における溶存酸素濃度の時間変化を測定した。細い内径のチューブを流れてきた高濃度溶存酸素水は円筒型水槽において低濃度酸素水中を拡散するが、この拡散過程に最大 8 T の磁場を印加して影響を調べるのが本実験の目的である。

溶存酸素計（Horiba, DO Meter OM-14）の電極は 35 ml 注射器用シリンジの中に横倒しの状態に入れており、シリンジの先端から流入してくる水に浸された状態であり、電極のまわりの水の攪拌は行わなかった。シリンジ内には常に水が充満している状態にしたが、シリンジの端に 1 カ所だけ水の出口を設けた。

高濃度酸素水はフラスコ内の水に酸素ガスを吹き込んで作成した。溶存酸素計では 20 mg/l までしか溶存酸素濃度が補償されていないが、アナログ出力を有する溶存酸素計（YSI 社製 MODEL57）で高濃度酸素水を測定した結果、出力電圧は 95.3

mV であった。同じ溶存酸素計で低濃度酸素水（約 8~9 mg/l）を測定した場合の出力電圧は 27.1 mV であった。

一方、実験系における流路の終点において溶存酸素濃度変化の測定に用いた溶存酸素計（Horiba, DO Meter OM-14）で低濃度酸素水（約 8~9 mg/l）を攪拌なしで測定したときの出力電圧は 220~270 mV であった。高濃度酸素水にこの電極を浸した時の出力電圧は出力可能な値の範囲外であった。

3. 結果および考察

Fig. 4 に磁場に暴露しない実験（Control 実験）における、流路終端における溶存酸素計の出力電圧変化を示す。始点から流入する水を低濃度酸素水から高濃度酸素水に変更した後、約 20 分後より電圧が上昇しはじめた。35 分後に 390 mV、58 分後に 470 mV まで達した。

一方、円筒型水槽の中心が 8 T 磁場に位置するように設置した場合の結果を Fig. 5 に示す。

円筒型水槽が超伝導マグネットのボアの中心から前後 ±160 mm の磁場に暴露された状態である。水槽の一端における磁場は約 4 T であるが、水槽の中心部へ向かって磁場強度は急峻に上昇し、約 50 mm のほぼ 8 T の平坦部分を過ぎた後、他端に向けて磁場強度は減少している。

実験結果は、終点における溶存酸素濃度がコントロール実験に比較して、酸素濃度上昇の開始までの時間が短くなり、しかも溶存酸素の増加が速くなったことを示している。すなわち、最大 8 T の磁場において、高濃度酸素水の流れが促進されることが示唆された。

Fig. 3 における磁気力分布図を参照すれば、円筒型水槽内における流れの上流側（左半分）の溶存酸素の集団に対し、流れ方向に磁気力が作用していることが考えられる。流れの上流側に比較して、流れの下流側の溶存酸素濃度は低いと考えられるため、流れの上流側に存在する溶存酸素集団への磁気力の効果

Fig. 4 Time-course of the change in the output level of a dissolved-oxygen meter, indicating the change in the dissolved oxygen concentration of water taken from the outlet of the water chamber.

Fig. 5 Effect of magnetic fields on the diffusion of dissolved oxygen molecules in water. A cylindrical water chamber (diffusion-chamber) was placed in the center of the superconducting magnet. The central part of the chamber was exposed to an 8 T magnetic fields, and both ends of the chamber were exposed to magnetic fields of 3.5–4.0 T.

Fig. 6 Process of diffusion of dissolved oxygen molecules in magnetic fields of up to 8 T. One of the edges (the inlet) of a chamber was exposed to an 8 T magnetic field, and another (the outlet) was exposed to magnetic fields of less than 0.5 T.

が生じたと解釈できる。

次に、円筒型水槽の一端が超伝導マグネットのボアの端に位置し、かつ他端がボアの中心に位置するように設置した場合の

結果を Fig. 6 に示す。この条件では円筒型水槽内の溶存酸素集団全てに対し、流れに逆らう方向へ磁気力が作用すると考えられる。始点において流路に流入する水を低濃度酸素水から高濃度酸素水に変更した後、終点における溶存酸素濃度が最初に上昇し始めるまでの時間は、Fig. 5 での 10 分に対し Fig. 6 では 15 分に延長された。また、Fig. 5 の結果と比較すると、溶存酸素濃度上昇の初期速度は Fig. 6 では減少していた。本実験条件における顕著な効果は 35 分後に溶存酸素計の出力電圧が 500 mV 付近に達した時点において見られた。実験結果は、終点における溶存酸素濃度変化が順調な上昇傾向から一転して 500 mV 付近で上昇・下降を 5～10 分間隔で繰り返したことを示す。この結果は、円筒型水槽内の溶存酸素集団に対し、流れに逆らう方向へ磁気力が作用したことが原因であると考えられる。

Fig. 6 に示された実験条件において、円筒型水槽内の溶存酸素集団に対し、流れに逆らう方向へ磁気力が作用したにもかかわらず、終点における溶存酸素濃度の初期上昇速度が、Fig. 4 における Control 実験の場合より増大した原因として、円筒型水槽の上流側の流路内の溶存酸素集団が勾配磁場の影響を受けたことが考えられる。

ここで、酸素分子とほぼ同じ大きさの常磁性の剛体球に磁気力が作用した場合に移動する距離と、剛体球が熱運動によって移動する距離との比較を行う。

温度 T においてこの剛体球が熱運動によってブラウン運動を行いながら移動する距離 $\Delta x_T(t)$ の 2 乗は式 (1) で表される。 r は剛体球の半径、 η は水粘性係数である。温度 T は 300 K とする。

$$(\Delta x_T(t))^2 = 2 \frac{k_B T}{6\pi\eta r} t = 17.64 \times 10^{-6} \times t \quad (1)$$

次に、この剛体球の集団が気体分子運動を行っている際のモル磁化率が気体酸素と同じであると仮定する。常磁性剛体球には理論上、式 (2) で表される磁気力が作用する。ここで χ は 1 mol の気体酸素の磁化率をアボガドロ数で割った値とする。

$$F = ma = \frac{\chi}{\mu_0} B \frac{dB}{dz} \quad (2)$$

磁場と磁場勾配の積が $400 \text{ T}^2/\text{m}$ のときに、常磁性の剛体球に磁気力が作用した場合に移動する距離は式 (3) で与えられる。

$$(\Delta x_M(t))^2 = 4.64 \times 10^8 \times t^4 \quad (3)$$

式 (1) および式 (3) によって、剛体球の移動距離の 2 乗をナノ秒からミリ秒までの時間において計算した結果を Fig. 7 に示す。実線が熱運動（ブラウン運動）による移動距離、破線は磁気力によって加速され、他の分子と衝突がない場合の直線移動距離を示す。

Fig. 7 によると、常磁性剛体球が分子と衝突しない場合に 10^{-5} cm 移動したとしても、熱運動による移動距離がほぼ同じオーダーであるため、剛体球が磁気力によって移動する様を観察することは困難であろうと思われる。一方、10 ミリ秒後には磁気力による直線移動距離は約 1 cm であるが、熱運動による

Fig. 7 Comparison of Brownian motion and magnetically accelerated motion.

Fig. 8 Model of diffusion of dissolved-oxygen-rich water in gradient magnetic fields.

移動距離は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm である。したがって常磁性剛体球が他の分子と時々衝突しながら移動していく場合は移動距離が減少すると思われるが、実験室レベルでの観察時間（数分から数時間）において溶存酸素のような水溶液中に存在する、常磁性剛体球が磁気力によって移動した痕跡（例えば濃度変化のような現象）を観測できる可能性があると考えられる。

本研究の実験結果について、以下のように考察ができる。

1) 高濃度溶存酸素水が低濃度溶存酸素水中へ、定常的な流圧によって流れていく場合、4~8 T の勾配磁場は拡散速度を上昇させる効果がある。Fig. 8 に示すように流れの上流に高濃度溶存酸素水が存在し、下流に低濃度酸素水が存在するため、両者の磁化率の相違に起因する磁気力の差によって、高濃度溶存酸素水の拡散が促進されたと考えることができる。

2) 高濃度溶存酸素水が低濃度溶存酸素水中へ拡散する領域において、溶存酸素集団に作用する磁気力が流れに逆らう方向に向く場合、領域内の最下流における溶存酸素濃度がある閾値（約 20 mg/l 以上）を超えた時点から、溶存酸素集団の拡散を抑制する効果が見られる。

本研究で得られた結果は、生体系の水に含まれる溶存酸素の拡散などの輸送過程を強磁場で制御することによる生体工学的応用の可能性を示唆する。例えば、組織内の酸素濃度を磁場で調節することによって、生体内の活性酸素が関与する反応の制御などが期待できる。詳細な検討を進めるためには、磁場中の溶存酸素分子あるいは酸素分子集団の動力学的解析、生体に対する強磁場の安全性などに関する研究をさらに推進していく必要がある。

謝 辞 本研究はその一部を文部省科学研究費補助金一般研究 (B) 07458235 によった。

文 献

- 1) S. Ueno and K. Harada, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-18**, 1704 (1982).
- 2) S. Ueno, M. Iwasaka, and T. Kitajima, *J. Appl. Phys.*, **75**, 7174 (1994).
- 3) 上野, 岩坂, 北島, 日本応用磁気学会誌, **18**, 683 (1994).
- 4) S. Ueno, M. Iwasaka, and G. Furukawa, *IEEE Trans. Magn.*, **31** (1995).

1995 年 10 月 16 日受理, 1996 年 1 月 12 日採録