白金黒表面における固定化酵素活性の磁場による抑制効果

正員 矢尾板 仁 (帝京科学大学)

正員 岩坂 正和 (東京大学)

正員 上野 照剛 (東京大学)

Magnetical disturbance of immobilized-enzyme-activity on a platinum-black electrode

Masashi Yaoita (Teikyo University of Science & Technology)

Masakazu Iwasaka, and Shoogo Ueno (The University of Tokyo)

Magnetical effect to enzyme activity of immobilized catalase or peroxidase was examined by an electrochemical method. In buffer solution contained 10 mM H_2O_2 , oxidation current on an enzyme-immobilized-electrode ($\phi=0.1\text{mm}$ platinum-black electrode) was monitored under static strong magnetic fields. We observed increase of current with catalase-immobilized-electrode under 8 T. It means that immobilized-catalase-activity was disturbed magnetically. On the other hand, magnetical disturbance of immobilized-peroxidase-activity was extremely small under 14 T. From these results, we conclude that a catalase differs from a peroxidase in magnetical disturbance of immobilized-enzyme-activity.

キーワード：定常磁場，白金黒電極，固定化酵素活性，カタラーゼ，ペルオキシダーゼ

Keywords: static magnetic field, platinum-black electrode, immobilized enzyme activity, catalase, peroxidase

1. まえがき

「生体への強磁場の影響」を明らかにして行く上で、「酵素反応への強磁場の影響」を明らかにすることが重要なステップになることは、異論の無いところであろう。しかし、現在までのところ、生体システムよりはるかに単純なはずの「酵素反応への磁場の影響」について、解っていることは少ない。「溶液中での酵素反応への磁場効果」に関しては多くの研究報告があるが、磁場によってどのような効果があるのかも不明確であり、磁場の作用機構が明らかになっているものは極めて少ない⁽¹⁾。

一方、固体表面に固定化した酵素の活性への磁場効果については、ほとんど研究が行われていないのが現状である。細胞中の酵素は、細胞膜や細胞骨格などに固定されていたり、関連した酵素反応を起こす複数の酵素がクラスターを作っているなど、生体内では何らかの形で固定化または局在化しているものも多い。そのため、生物や細胞への磁場効果を明らかにするためには、「溶存状態での酵素反応への磁場効果」以上に「固定化された酵

素（反応）への磁場効果」を明確にすることが重要と考えられる。

我々は、酵素反応がモニタリング可能な固定化酵素系として、酵素センサに注目した。良く知られているように、酵素センサはバイオセンサの一種で、酵素反応を利用した化学物質検知装置である。電気化学測定を応用した酵素センサは、固定化酵素の反応速度を簡便にモニタリングできる。近年、酵素センサ作製技術の進歩によって、電極表面に直接酵素を固定化した極めて単純な構造の酵素センサが開発されており、その応答電流の解析が容易であると期待できる。このような酵素センサの技術を応用して固定化酵素電極を作製すれば、固定化酵素反応速度への強磁場の効果を調べることができる。

強磁場中で電気化学測定系を用いる場合、測定電流が磁場の影響を受けることが懸念されるが、測定電流が微小な場合には磁場の影響は極めて小さいことが確認されている⁽²⁾。固定化酵素電極を用いる方法は、適切な酵素反応を選べば経時的に連続計測が可能であり、固定化酵素の「酵素反応の速度変化」をモニタリングできる可能性

がある。

本研究では、その表面に直接酵素を固定化できる白金黒電極を、過酸化水素検知電極として用いた⁽³⁾。酵素としては、カタラーゼとペルオキシダーゼを選んだ。カタラーゼは、ガンや老化の原因物質の一つとされている過酸化水素を分解し無毒化する。また、ペルオキシダーゼはカタラーゼと同様に過酸化水素を分解する。カタラーゼまたはペルオキシダーゼを電極上に固定化した酵素固定化電極を作製し、過酸化水素を含む緩衝液中で過酸化水素の酸化電流を測定することによって、「磁場による固定化酵素の活性変化」を調べた。

2. 実験方法

<2.1>酵素固定化電極の作成方法⁽³⁾

白金線をガラスに封入して研磨し白金円盤電極（直径 $\phi=0.1\text{mm}$ ）を作成後、その表面に塩化白金酸溶液中で白金黒層を定電位電析して白金黒電極とした。電極を蒸留水で洗浄後、酵素溶液中（50 mg/ml カタラーゼまたは 50 mg/ml ペルオキシダーゼ）に 30 分間浸漬させ、白金黒電極表面に酵素を固定化した。この酵素固定化白金黒電極を 0.1M リン酸緩衝液（pH6.5）中で十分に洗浄した後に実験に用いた。

<2.2>超電導磁石を用いた実験方法

一端を閉じたガラス管（容積約 200ml、内径 15mm）を反応セルとして、その中に $1 \times 10^{-2}\text{M}$ 過酸化水素を含む

図1 白金黒電極上での酵素反応および電気化学反応の概念図

Fig. 1 Enzyme reaction and electrochemical reaction on a platinum-black electrode.

0.1M リン酸緩衝液を満たした。酵素固定化電極を作用極として、対極（白金線）、参照電極（銀・塩化銀電極；BAS社製 RE4）とともに、ガラス管の一端にシリコン栓で管と平行に固定した。超電導磁石内の測定部位（ボア内）の中心に電極がくるように、このガラス反応セルを置いた。ポテンシオスタットによって+0.475V(vs. Ag/AgCl)の電位を印加し、電極の応答電流を測定してy-tレコーダーに経時変化を記録した。ガラスセル内は無攪拌の状態で測定を行った。温度による誤差を抑制するために磁石のボア内を気温と同じ温度に設定した。

定常磁場発生装置として、水平型超電導磁石を使用した⁽²⁾。まず、超電導磁石から離れたところで電極に所定の電位をかけ、応答電流が安定したところで超電導磁石のボア内に入れた。その後、応答電流が安定するのを待って磁石からガラス反応セルを取り出し、再度電流が安定したことを確認して測定を終了した。まず、リン酸緩衝液のみの溶液中で定電位を印加したときに流れる残余電流を測定し、過酸化水素溶液中での応答電流から残余電流を引いたものを電極応答電流と考えた。しかし、測定の結果、応答電流が数 μA の応答であるのに対して、残余電流は数 nA のため、残余電流は無視できると判断し今回の測定では測定電流をそのまま電極応答とした。

3. 測定原理

今回は、過酸化水素検知電極として、微粒子状の白金を白金電極上に電析させた白金黒電極を用いた。表面が凸凹に富んでいる白金黒電極は、平滑な白金電極と比較すると数百から数千倍の表面積を持つため、高感度過酸化水素検知電極として働く。この白金黒電極を酵素溶液中に浸すだけで、白金黒表面に多量の酵素を直接固定化できる。多孔性表面を持つ白金黒は、過酸化水素検知電極であると同時に酵素固定化マトリクスであり、その表面積が大きいほど酵素の固定化量が多くなり、電極面積も大きくなる。その結果、検出される電流が大きく、マイクロ電極を用いても高い検出感度を持つことになる。

図1に示したように、電位を印加した場合、「酵素固定化電極」表面では以下の2種類の反応が競合して起きている。(1)の反応式で「固定化酵素」と表記したのは、白金黒電極表面に固定化されたカタラーゼ又はペルオキシダーゼである。

<酵素反応>

固定化酵素

<電気化学反応>

酵素が固定化されていない（又は固定化酵素が失活している）電極表面では、(2)の反応のみが起こり過酸化水素の酸化電流が測定される。一方、「酵素固定化電極」の場合、(1)の反応で過酸化水素が消費されたために、(2)の酸化電流は酵素反応が起こらない場合と比べて減少する。この減少分が酵素反応によって消費されたと仮定すれば、「固定化酵素の酵素反応」が「電流値の差」のかたちで評価できる。本実験では、酵素を固定化した電極と固定化していない（又は失活させた）電極の「電流値の差」から、固定化酵素の活性を評価した。この差を「固定化酵素の酵素反応」と仮定して、固定化酵素の酵素反応速度への磁場効果について調べた。

4. 実験結果

〈4.1〉カタラーゼ固定化電極応答電流の磁場中変化

10 mM 過酸化水素中で+0.475V(vs. Ag/AgCl)の電位をかけ、応答電流が安定したところで、超電導磁石のボア内の中心部にガラスセルを挿入した。この時の電流の経時変化を図2(A)に示す。図中の、○はボア外、●はボア中心の8T定常磁場中での電流値を示している。酵素の付いている電極では、磁場中へ挿入後、2倍程度の大きな電流値の上昇が認められ、磁場中では一定の値を示す。この電流増加は、電極を磁場中に入れた後数秒の間に起こり、セルを磁場から出すと数秒で元の電流値に戻る。

一方、酵素を固定化した後に失活させた電極を用いて同様の実験を行った。その結果を、図2(B)に示す。この電極でも変化は起こるが、酵素の付いている電極に比べ

(A)カタラーゼ固定化電極 (B)酵素活性の無い電極

(A) catalase-immobilized-electrode (B) platinum-black electrode

図2 強磁場中におけるカタラーゼ固定化白金黒電極の電流変化 (●: 8T 中, ○: 磁場外)

Fig. 2 Current change with a catalase-immobilized-electrode and a platinum-black electrode under 8 T. (●: 8T, ○: 0T)

極めて小さいことがわかった。また、酵素の付いていない白金黒電極についての実験結果も、失活させた電極の結果とほぼ同じであった。

さらに、過酸化水素濃度を变化させて (1×10^{-4} M, 1×10^{-3} M, 1×10^{-2} M, 1×10^{-1} M) 磁場内外での電流値を測定した。「酵素固定化電極」と「酵素をつけていない電極」の両方について測定した結果、酵素をつけていない電極では磁場の影響は認められなかった。「カタラーゼ固定化電極」では、高濃度の過酸化水素 (1×10^{-2} M, 1×10^{-1} M) 溶液中の場合にのみ 8T 磁場内において、2倍程度の電流値の増加が認められた。

〈4.2〉カタラーゼ固定化電極応答電流変化の磁場強度依存性およびボア内位置依存性

4.1 では定常磁場中にガラスセルを挿入したが、セルをボア内に固定して磁場を連続的に変化させても同様の現象が観測された (図3)。電流変化の磁場強度依存性の測定では、超電導磁石内のボア内中央部にセル中の電極先端部を固定して、磁場強度を連続して変化させた。磁場は 0T から 8T へ上げ、続けて 8T から 0T へ下げた。カタラーゼを固定化した「酵素固定化電極」では、磁場強度を変化させると磁場強度に依存して電流値が上下した。酵素の付いていない電極においても磁場強度によって変化が起こっているが、その変化は極めて小さかった。

図3 カタラーゼ固定化電極応答電流の磁場強度依存性 (10mM H_2O_2 溶液中)

●: 酵素固定化電極 (up), ○: 酵素固定化電極 (down)
▲: 酵素無し電極 (up), △: 酵素無し電極 (down)

Fig. 3 Magnetic field dependency of current with a catalase-immobilized-electrode.

Catalase-immobilized-electrode ●: up, ○: down

Platinum-black electrode ▲: up, △: down

図4 8T 磁場中におけるカタラーゼ固定化電極応答電流のボア内位置依存性 (10mM H₂O₂ 溶液中)

○: カタラーゼ固定化電極, △: 白金黒電極(酵素無し)
×: ボア外

Fig. 4 Position dependency of current change with a catalase-immobilized-electrode in bore under 8 T.

○: Catalase-immobilized-electrode, △: Platinum-black electrode
×: Outside bore

次に、電流変化のボア内位置依存性について検討を行った。まず、中心部 (0 cm) に電極先端部を置き、1 cm ずつ手前又は奥へセルをずらして測定を行った。超電導磁石のボア内中心部を 0 cm として電極を手前に動かしている時を (－) 奥に動かしている時を (+) で示した。図4に示した結果から、「酵素固定化電極」でも酵素を固定化していない電極でもボア内中心付近 (0 ～ 1 cm) に電流値の最小値が存在しており、類似のボア内位置依存性を示すことがわかる。± 4 cm では酵素の固定化していない電極でも 8T で約 15% 増加が認められた。しかし、中心部 (0 cm) のみに注目すると、酵素の固定化していない電極の電流値は磁場外とほとんど変わらないのに対して、「酵素固定化電極」では磁場外と比べて高い電流値を示した。

<4.3> ペルオキシダーゼ固定化電極電流の磁場中での変化

カタラーゼと同様にペルオキシダーゼ固定化電極を作製し、応答電流に対する磁場効果の検討を行った。実験当初、磁場の影響はほとんど認められなかった。しかし、ペルオキシダーゼを電極へ固定化して、洗浄した直後から測定を開始すると、磁場中での電流の増加が観察された (図5)。カタラーゼと比較すると増加率は小さいが、14T の磁場で測定開始 20 分まで電流増加が認められた。

図5 強磁場中におけるペルオキシダーゼ固定化白金黒電極の電流変化 (●: 14T 中, ○: 磁場外, ×: 酵素活性無し)

Fig. 5 Current change with a peroxidase-immobilized-electrode and a platinum-black electrode under 14 T. (●: 14T, ○: 0T)

さらに測定を続けると、測定開始 40 分後には磁場中での電流増加は極めて小さくなり、酵素活性の変化に由来するかどうかの判断が困難な値となった。

<4.4> 「固定化酵素への磁場効果」のカタラーゼとペルオキシダーゼの比較

酵素固定化電極では、まず酵素層で酵素反応により過酸化水素が分解され、次に酵素層を通り抜けて電極表面に到達した過酸化水素が電極上で酸化される。この電気化学反応による酸化電流が電流値として測定されるため、「酵素固定化電極」では酵素活性の無い電極よりも電流値はかなり低くなっている。この電流値の差が酵素活性に比例すると推定できる。表1に、カタラーゼとペルオキシダーゼをそれぞれ固定化した「酵素固定化電極」応答から推定した「酵素反応で消費された過酸化水素」／

表1 酵素固定化電極表面での酵素反応と電気化学反応の比率
Table 1 Reaction ratio of enzymatic and electrochemical reaction

	電流値 (μA)	
	カタラーゼ	ペルオキシダーゼ
E(-)	1.00	1.43
E(+)	0.39	0.70
E(-)-E(+)	0.61	0.73
反応の比率(%)	156	104

酵素活性なし (電気化学反応のみ) : E(-)

酵素活性あり (電気化学反応+酵素反応) : E(+)

酵素反応のみ (推定) : E(-)-E(+)

反応の比率 (酵素反応/電気化学反応) : (E(-)-E(+)) / E(+)

「電気化学反応で消費された過酸化水素」の比率を示す。電極表面でのカタラーゼの酵素反応速度は電極反応速度の 1.5 倍、ペルオキシダーゼは酵素反応と電極反応で単位時間あたりに消費された過酸化水素の分子数はほぼ同じと推定される。

カタラーゼの場合、磁場中では酵素反応は大きく抑制されるため、過酸化水素の酸化電流は約 2 倍になる。単純に「電気化学反応で消費された過酸化水素」+「酵素反応で消費された過酸化水素」=一定 と仮定すると、上の条件では磁場によって酵素反応が約 35%抑制された（最初の約 65%になった）ことになる（図 2 参照）。一方、図 5 から、ペルオキシダーゼの場合は、同様の仮定をして最大 20%抑制される（測定開始後 10 分の時点で最初の 80%となった）が、測定開始 40 分後には酵素反応への磁場の影響はほとんど無くなるのがわかる。

5. まとめ

「溶液中での酵素反応への磁場効果」については多くの研究報告があり、ほとんどの場合は磁場による酵素活性への影響は無いと判断できる。カタラーゼやペルオキシダーゼについても報告があるが、例えばカタラーゼの場合には、数 T の磁場によって「見かけの酵素活性」は変化しても「酵素活性」自体は変化しないことが明らかとなっている⁽¹⁾。このような報告を考慮すると、磁場によって影響を受けるのは「物質移動」過程である可能性が高い。しかし、「酵素反応」は、一般に「物質移動」との分離が難しいため確認が困難である。「物質移動」に関しては「酵素反応」も通常の化学反応と同様であり、これに関しては近年急速に多くのことが明らかになっている^{(4), (5)}。先のカタラーゼの場合は、平衡状態からはずれて酸素の濃度勾配が存在する場合に顕著な磁場効果が認められると報告されている⁽¹⁾。

本実験では酵素を固定化することによって、電極表面には常に過酸化水素や酸素などの濃度勾配が存在する。そのため、 H^+ や O_2 の濃度勾配によって電極表面近傍に

強磁場による局所流れができて、その攪拌効果によって物質移動が促進され、その結果として電流値が増加する可能性が考えられる。

本実験では、電極は磁場方向と平行に固定されているが、白金黒は多孔性であるため、球型に近似できる白金黒微粒子（直径約 $0.1\mu m$ ）上で酵素反応と電気化学反応が起こっている。そのため、あらゆる方向に反応が起こっていると考えて良い。また、マイクロ領域での反応を考えており、電極表面の電気化学反応はほぼ均一として取り扱える。この実験条件では、「電極表面で部分的に反応速度が違うために濃度勾配が生まれ、磁場による部分流れが発生して電流が変化する」といった電極特性に由来する副次的な効果の心配はほとんど無い。

MHD 効果を考えた場合、 H^+ が発生する電気化学反応によって電極表面での流れが起こる可能性はあるが、酵素反応ではその様な流れが起こるとは考えられない。また、 $0.1mm$ 程度のマイクロ領域に限定すると、磁気勾配のほとんど無い磁石中心部において、体積磁化率の違いで大幅な電流増加を引き起こすような局所流れを引き起こすのは、かなり大きな濃度差が無い限り難しい。前述の反応式（1）と（2）を比較すると、電気化学反応の場合の方が酵素反応よりも攪拌効果が上がることになってしまい、実際の実験結果と矛盾する。すなわち、この条件では、磁場による酵素固定化電極表面での局所流れは発生していないと結論できる。

しかも、カタラーゼとペルオキシダーゼの酵素反応は、基本的には同一であると考えられることから、これらの酵素を固定化した電極の応答電流が受ける磁場の影響は同一でなければならない。ところが、実際には異なる実験結果が得られている（図 2、図 5 参照）。カタラーゼ⁽⁶⁾は MW24 万の四量体（モノマーは MW6 万）、ペルオキシダーゼ⁽⁷⁾は MW4 万の単量体だが、活性中心は類似しており鉄イオンを含む（表 2 参照）。しかし、活性中心への磁場効果が認められないことは、溶液中での酵素活性への影響が無いことから明らかである。

この研究の従来の研究との大きな違いは、

- ①固定化酵素の使用
- ②電気化学測定法の採用
- ③マイクロ領域での測定

の三点である。先に論じたように②が原因ではないことは明らかである。③については、今回は検討していない。しかし、我々の過去の研究⁽²⁾において、グルコース酸化酵素を同じ系に適用した結果があり、その時にも小さいながら磁場による酵素反応抑制効果が認められた。この時に、白金黒ではなく白金線表面へ酵素を固定化した実験を行ったが、白金黒電極との差異はほとんど無かった。これらの結果は③が原因である可能性が低いことを示唆している。一般的に考えると、実験をマイクロ領域で行えば種々の磁場効果は無視できるほど小さくなることが予

表 2 カタラーゼとペルオキシダーゼの比較
Table 2 Comparison between catalase and peroxidase

	カタラーゼ	ペルオキシダーゼ
酵素番号	EC 1.11.1.6	EC 1.11.1.7
分子量($\times 1000$)	約 240(60×4)	約 40
サブユニット数	4	1
等電点	5.5	6.0~6.5
分布（存在）	好氣的細胞全て	主に植物組織
酵素の作用基	プロトヘム(Fe^{3+})	プロトヘム(Fe^{3+})

文献

- (1) S. Ueno, M. Iwasaka: "Catalytic activity of catalase under strong magnetic fields of up to 8 T", *J. Appl. Phys.*, **79**(8), pp.4705-4707 (1996).
- (2) 矢尾板仁, 岩坂正和, 大塚一郎, 上野照剛: "強磁場における酵素反応の電気化学モニタリング", 日本応用磁気学会論文誌, **vol.20**, pp.709-712 (1996).
- (3) Y. Ikariyama, S. Yamauchi, T. Yukiashi, H. Ushioda: "Micro-enzyme electrode prepared on platinized platinum", *Anal. Lett.*, **20**(9), pp.1407-1416 (1987).
- (4) N. Hirota, Y. Ikezoe, H. Uetake, K. Kitazawa: "Magnetic field effect on the kinetics of oxygen dissolution into water", *Materials Transactions, JIM*, **41**, pp.976-980 (2000).
- (5) K. Shinohara, R. Aogaki: "Magnetic field on copper corrosion in nitric acid", *Electrochemistry*, **67**, pp.126-131 (1999).
- (6) I. Fita, A. M. Silva, M. R. N. Murthy, M. G. Rossmann: "The refined structure of beef liver catalase at 2.5 Å resolution", *Acta Cryst.*, **B42**, pp.497-515 (1986).
- (7) K. Fukuyama, N. Kunishima, F. Amada, T. Kubota, H. Matsubara: "Crystal Structures of cyanide- and triiodide-bound forms of *Arthromyces ramosus* peroxidase at different pH Values", *Biol. Chem.*, **270**(37), pp.21884-21892 (1995).

矢尾板 仁

(正員) 1960年1月17日生。1988年東京工業大学工学部理工学研究科化学工学専攻博士課程修了。国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所研究員を経て、1993年4月帝京科学大学バイオサイエンス学科助教授、現在に至る。工学博士。研究分野はバイオエレクトロニクス(バイオセンサ)、細胞工学など。日本化学会、電気化学会、日本エム・イー学会 会員。

上野 照剛

(正員) 1943年10月1日生。1966年九州大学工学部電子工学科卒業。九州大学工学部助手、助教授を経て、1986年より同教授。1994年4月東京大学医学部医用電子研究施設教授、1997年4月同大学院医学系研究科生体物理医学専攻教授、現在に至る。工学博士。バイオマグネティクス、生体電磁界影響、生体磁気計測、神経磁気刺激などの研究に従事。電気学会 電磁界生体影響問題調査特別委員会第2作業部会委員長、日本エム・イー学会、日本生体磁気学会、日本応用磁気学会、IEEE 会員、Bioelectromagnetics Society 会員。

岩坂 正和

(正員) 1965年4月3日生。1988年九州大学工学部電子工学科卒業。1992年7月九州大学工学部電子工学科助手、1994年7月東京大学医学部医用電子研究施設助手、1997年4月同大学院医学系研究科生体物理医学専攻助手、1998年8月同講師、現在に至る。工学博士。生物物理化学的な磁界効果研究に従事。電気学会、日本エム・イー学会、日本生体磁気学会、日本応用磁気学会、電気化学会、高分子学会、IEEE Magnetics Society 会員、Bioelectromagnetics Society 会員。

想され、実験系をマイクロ領域で行ったことが原因で大きな変化が起こることは考えにくい。

以上のことから、この現象の原因として最も可能性が高いと考えられるのは①ということになる。では、電極表面での「磁場による固定化酵素反応の抑制」はどのような機構が有り得るだろうか。「タンパク質の固体表面への吸着機構」が研究中である現在、可能性のあるもの全てを挙げることは不可能である。しかし、我々は次の二つの機構が検討する価値があると考えている。

(A) 電極表面の酵素層内を H_2O_2 分子または O_2 分子が透過する際の「透過し易さ」へ磁場が影響を与える。

(B) 電極上での酵素分子の位置関係が磁場によって影響を受け、活性中心への H_2O_2 分子への到達が抑制される。

酵素分子は白金黒電極表面に吸着している。今回の実験で用いた酵素濃度では、酵素は電極上でクラスターを形成している可能性が極めて高い。しかも、電極表面に強く吸着されている酵素分子層の上にそのクラスターが乗っており、時間とともにある程度動くことが可能である。このモデルは現在検討中のものだが、このモデルを適応すれば、強磁場が電極表面へ半固定化されている酵素分子の動きへ影響を与えることは可能と推測できる。

「半固定化されている酵素分子同士」での「分子レベルの近距離」で起こる現象あれば、磁場の効果も固体内に近い考え方ができる。もちろん固体表面特有の種々の効果を考慮する必要はあるが、「分子が通り抜ける酵素間のミクロな隙間が磁場によって変化する」可能性や、「鉄イオンを含む活性中心同士が隣の分子やサブユニットの酵素反応に影響を与える」可能性などがありうる。グルコース酸化酵素を用いた研究⁽²⁾では、小さいながらも抑制効果があった。グルコース酸化酵素の活性中心は有機物質であり鉄イオンは含んでいない。これらのことを考えると、「磁場による固定化カタラーゼの酵素活性抑制効果」は、これらの複合効果とも考えられる。

以上の議論を考慮すると、固定化ペルオキシダーゼの実験(図5参照)における磁場効果の経時変化は、「酵素の吸着」と「固定化酵素の磁場効果」との関連を示唆するものと解釈できる。しかし、前述のように、「タンパク質の固体表面への吸着機構」自体が現在活発に研究されている最中の複雑な過程であり、この結果のみで単純に結論を出すのは困難である。固定化酵素の酵素活性への磁場効果を明らかにできれば、生体内での「物質移動」への磁場効果を明らかにする手がかりが得られるものと考えられる。本研究ではそのヒントを得たのみだったが、今後も「固定化酵素への磁場効果」についての研究を積み重ねることによって、各種の生体への磁場効果を解明する一助となることが期待できる。

(平成13年5月24日受付, 平成13年8月10日再受付)