

## 論 文

# 誘電泳動フィルタを用いた液体中の懸濁微粒子の除去と回収

周 広斌\*, 今村 学\*, 末廣 純也\*,<sup>1</sup>, 原 雅則\*

(2002年4月15日受付; 2002年11月8日受理)

## Elimination and Collection of Fine Particles Suspended in Liquid Using the Dielectrophoretic Filter

Guangbin ZHOU\*, Manabu IMAMURA\*, Junya SUEHIRO\*,<sup>1</sup> and Masanori HARA\*

(Received April 15, 2002; Accepted November 8, 2002)

Dielectrophoresis (DEP) is the electrokinetic motion phenomena of dielectrically polarized particles in a nonuniform electric field. DEP has found many useful biotechnological applications including separation, levitation and characterization of dielectric particles and biological cells. In this study, the authors propose a new type of the electrostatic filter for liquid cleaning by utilizing the DEP force to eliminate fine particles from the suspension liquid. The filter consists of an electrode system that is filled with many dielectric particles. These particles modify electric field distribution in the electrode system so that the strong DEP force is generated on their surfaces. If the DEP force is stronger than the drag force exerted by streaming liquid in the filter, the suspended particles can be trapped and eliminated from the liquid. It was experimentally confirmed that the proposed filter could continuously eliminate yeast cells suspended in water. The results indicated that the cell concentration at the filter outlet decreased from  $10^6$  cells/mL to  $10^1$  cells/mL in about an hour. Optical observation of cell behavior in the filter revealed that cells were trapped mainly in the high electric field region by positive DEP. The proposed DEP filter can control trapping and releasing process just by adjusting the applied voltage or the resultant DEP force.

### 1. はじめに

水などの液体から微生物などの混入異物を除去することは、最も基本的かつ重要な液体処理技術の一つである。従来、このような異物除去にはもっぱらフィルタが用いられてきた。フィルタには素材や構造に多種多様なものが存在するが、それらの多くは「除去対象である異物より小さな穴や網目に機械的に異物を引っかけて除去する」という共通の原理を採用している。したがって、従来のフィルタでは捕集される異物数が増加するに伴い穴が塞がれるため(いわゆる「目詰まり」), 液体をフィルタに流す際の圧損が増大し、流量や処理速度が低下することが問題となる。フィルタに捕集された異物は穴の内部に機械的に付着・保持されるため、洗浄などによって取り除くことは困難である。このため、フィルタは逐次新品と交換する必要があり、

**キーワード:** 誘電泳動, フィルタ, 誘電体粒子, イースト菌, 菌濃度

\* 九州大学大学院システム情報科学研究院電気電子システム工学部門(812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, Hakozaki 6-10-1, Higashiku, Fukuoka 812-8581, Japan

<sup>1</sup> suehiro@ees.kyushu-u.ac.jp

ランニングコストの上昇を招く。また、フィルタの利用方法として、異物除去だけでなく捕集した異物の回収装置としての応用も考えられるが、この場合も従来のフィルタでは前述の理由から十分な回収効率を期待することはできない。従来のフィルタが持つこのような問題点を解決するためには、機械的な捕集メカニズムに代わる新しい捕集原理に基づくフィルタを実現する必要がある。筆者らは、電気力学現象の一つである誘電泳動現象に着目し、これを液体中の異物除去に応用した誘電泳動フィルタについて検討している<sup>1)</sup>。本論文では、提案したフィルタの原理・構造、モデル電極系を用いた誘電泳動現象の観察結果、試作した誘電泳動フィルタの基本特性について述べる。

### 2. 誘電泳動フィルタの構造と原理

従来より、誘電泳動を応用した液体からの懸濁物質分離が試みられている。それらの多くは、ガラス基板上にフォトリソグラフィーで作製した薄膜電極の表面に沿って処理液体を流し、薄膜電極のエッジおよび電極ギャップ間に形成される局所的な不平等電界を利用して誘電泳動力を発生するものである<sup>2)</sup>。しかし、このような薄膜電極では誘電

泳動力が作用する領域は電極表面近傍に限られるため、フィルタのように大量の液体を連続的に処理する使い方には適していない。また、Docolis らは、電極ギャップ間のガラス基板をエッティングして作成したスリットを通して処理液体を流し負の誘電泳動（後述）を利用して選択性に懸濁微生物を分離できる誘電泳動フィルタを提案している<sup>3)</sup>。このフィルタは、物質を捕集しないため目詰まりしにくいという長所があるが、物質の濃縮や回収には利用できない。筆者らが提案した誘電泳動フィルタの原理図を図1に示す。誘電泳動フィルタの基本構造は、対向する電極のギャップ間に多数の誘電体粒子を充填させた形となっている。充填した誘電体粒子間には隙間が存在し、この部分に異物を含む液体を流すことができる。誘電体粒子の大きさを適当に選び、粒子間の隙間が処理対象の異物よりも大きくなるようにすれば、異物はこの隙間を通り抜けて流れるので捕集されず、フィルタとしては機能しない。一方、電極間に適切な強度と周波数を持つ交流電圧を印加すると、誘電体粒子近傍には不平等電界が形成され、その近傍の異物には誘電泳動力が作用する<sup>4)</sup>。この誘電泳動力が液体が及ぼす粘性抵抗力を上回る場合、異物は誘電体粒子表面に捕集される。充填する誘電体粒子の数を増やせば、このような誘電泳動作用点を電極ギャップ間に多数作ることができるので、液体を流しながら効率的に異物除去を行うことができる。誘電体粒子の間隔を異物の粒径よりも広くすることができるため、異物が捕集されても直ちに「目詰まり」が起こるようなことはない。また、電界を低下させ誘電泳動力を弱くすれば捕集されていた異物は誘電体粒子表面から離脱するため、フィルタの洗浄やフィルタからの異物の回収も容易である。誘電泳動力は捕集される物質の誘電特性（誘電率、導電率）に依存する。したがって、電界の周波数などを適切に選択すれば、同じ大きさの物質であっても誘電泳動力の大きさや方向を変化させることができる。このことを利用すれば、誘電特性の違いを利用した選択性的物質捕集・回収が可能となる。これは、大きさによっての

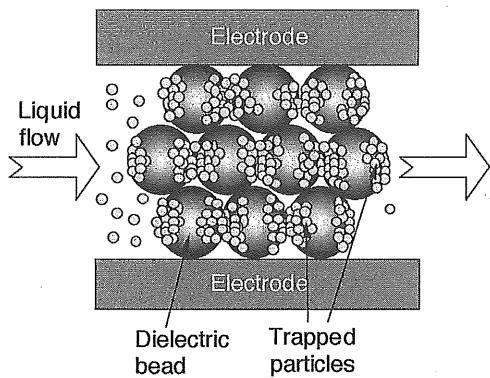


図1 誘電泳動フィルタの原理図

Fig.1 Principle of a dielectrophoretic filter.

み物質を選別除去する従来のフィルタにはない機能である。電極間に誘電体を挿入することにより不平等電界を発生させ、これによって得られる誘電泳動力により液体中の不純物粒子を除去する方法は、これまでにも「静電式淨油装置」として油中の不純物粒子除去に応用されている<sup>5)</sup>。しがしながら、従来の装置では板状の誘電体が使用されており、図1のように誘電体粒子を多数充填することにより効率よく高電界領域を形成する試みは例がない。また、従来の装置は専ら油を処理対象としており、油よりも導電率の高い水などの液体の浄化に誘電泳動フィルタを適用した例は少ない。

提案した誘電泳動フィルタの動作特性に最も影響を及ぼす要因は、フィルタ内部、特に充填した誘電体粒子近傍での電界分布である。そこで、コンピュータシミュレーションコード（Maxwell 2D, Ansoft Corp, USA）を用いて電界計算を行い、発生する誘電泳動力について定量的な検討を行った。球形の異物粒子に作用する誘電泳動力  $F_{DEP}$  は理論的に以下の式で与えられる<sup>6,7)</sup>。

$$F_{DEP} = 2\pi a^3 \epsilon_m \operatorname{Re}[K] \nabla |E|^2 \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_m$ ：懸濁媒質（水）の誘電率、 $a$ ：異物粒子（球形に近似）の半径、 $E$ ：電界である。 $K$  は Clausius-Mossotti 関数で、次式で与えられる。

$$K = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \quad (2)$$

ただし、 $\epsilon_m^*$ ：懸濁媒質の複素誘電率、 $\epsilon_p^*$ ：異物粒子の複素誘電率である。誘電率  $\epsilon$ 、導電率  $\sigma$  の誘電体の複素誘電率は次式で定義される。

$$\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (3)$$

ただし、 $\omega$  は印加電界  $E$  の角周波数である。(1)式から明らかなように、誘電泳動力の方向は  $\operatorname{Re}[K] > 0$  の場合は高電界方向、 $\operatorname{Re}[K] < 0$  の場合は低電界方向となり、これらをそれぞれ正の誘電泳動、負の誘電泳動と呼ぶ。懸濁液体（水：比誘電率 80、導電率 0.1 mS/m）で満たされた平行平板電極系のギャップ中央に誘電体粒子（ガラスピーズ：比誘電率 5.5、抵抗率無限大）を 3 個挿入した場合の中央の誘電体粒子表面の電界分布を数値計算で求めた例を図2に示す。計算では、簡単のために誘電体粒子を紙面垂直方向の無限長円柱に二次元近似した。同図より、粒子表面の電極対向部 ( $\theta=0, 180^\circ$ ) には低電界部、隣り合う粒子との接触部 ( $\theta=90, 270^\circ$ ) には高電界部が形成されることがわかる。この電界分布から、(1)式右辺に含まれる  $\nabla |E|^2$  の粒子表面分布を求めた結果、その分布は図2の電界分布と類似しており、 $\theta=90, 270^\circ$ において最大値をとることがわかった。懸濁

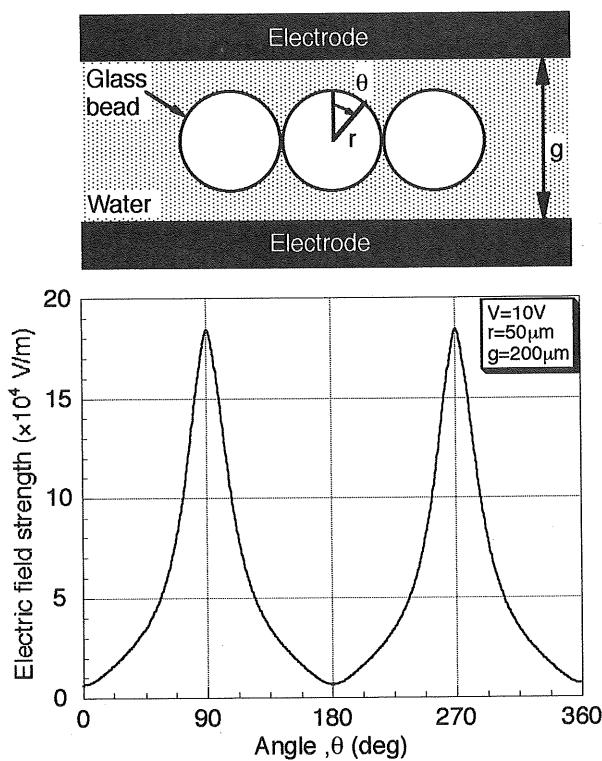


図2 誘電体粒子表面の電界分布

Fig.2 Electric field distribution around a dielectric bead.

液や捕集粒子の物性値が一定であれば、誘電泳動力は  $\nabla|E|^2$  に比例するため、誘電泳動力もこの部分で最大となるものと予想される。更に、誘電体粒子の大きさを変化させて同様の計算を行った結果、 $\nabla|E|^2$  の最大値は粒子径が小さいほど大きくなることがわかった<sup>1)</sup>。

### 3. 実験装置と実験方法

#### 3.1 モデル電極を用いた誘電泳動現象の観察

予備実験として、誘電泳動フィルタの構造を模擬したモデル電極系を作成し、誘電泳動現象の観察を行った。モデル電極系の構造を図3に示す。スライドガラス上に、厚さ

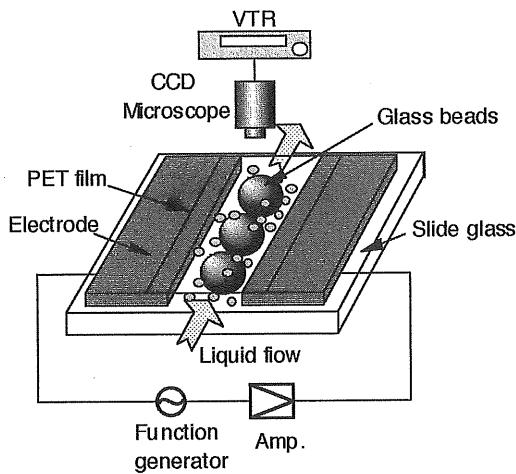


図3 モデル電極を用いた実験装置

Fig.3 Experimental setup using a model electrode.

200μm、長さ30mmの銅板をギャップ長200μmで対向させた平行平板電極系を作成した。電極ギャップ間に誘電体粒子として直径200μmのガラスピーブを約100個充填した後、電極上部から観察できるように透明なPETフィルムで覆いチャンバーを形成した。捕集対象粒子としてはイースト菌 (*Saccharomyces cerevisiae*, 平均粒径8μm) を用いた。イースト菌懸濁液(濃度10<sup>6</sup>cells/mL, 導電率0.6mS/m)を最大流量150mL/hの範囲でチャンバーに流しながら、電極間に100kHz, 最大100V<sub>pp</sub>の交流電圧を印加し、イースト菌の挙動をCCDマイクロスコープ(KEYENCE, VH-6300)を用いて観測した。

#### 3.2 誘電泳動フィルタの基本特性

提案した誘電泳動フィルタを実際に試作し、誘電泳動フィルタの基本特性としてフィルタ出口菌濃度の電圧依存性と初期濃度依存性を測定した。実験装置の概要を図4に示す。厚さ2mmのステンレス鋼板(160mm×160mm)2枚の間に厚さ800μmのゴムパッキンを挿入し、その内側の空間(100mm×100mm)に直径200μmのガラスピーブを約100万個充填した。各々の電極に設けられた懸濁液の流入・流出口を通して、イースト菌懸濁液(導電率0.6mS/m)を流量60mL/hでフィルタに流しながら、電極間に100kHz, 140V<sub>pp</sub>の交流電圧を印加した。電圧依存性については初期濃度を10<sup>6</sup>cells/mL一定として電圧の有無によるフィルタ出口菌濃度の経時変化を調べた。初期濃度依存性については、印加電圧を140V<sub>pp</sub>一定とし初期濃度を10<sup>6</sup>~10<sup>3</sup>cells/mLの範囲で変化させた場合のフィルタ出口菌濃度の変化を測定した。菌濃度は、ポテトデキストロース培地を用いた平板培養法(測定下限10<sup>3</sup>cells/mL)を用いて測定した。なお、予備実験により、フィルタ実験と同じ実験条件下では、電界印加による菌活性への影響がないことを確かめ、更に10<sup>4</sup>cells/mL以上の菌濃度では血球計算盤により決定した菌濃度と培養法の結果が±10%以内で一致することを確認した。

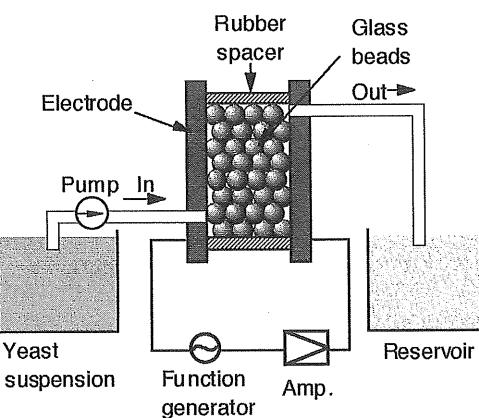


図4 誘電泳動フィルタ実験装置

Fig.4 Experimental setup using a dielectrophoretic filter.

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 モデル電極を用いた誘電泳動現象の観察

電圧を印加しない場合、図5(a)に示すようにイースト菌はガラスビーズに捕集されることなくビーズの隙間を通して流れた。印加電圧を徐々に上昇させ約 $50V_{pp}$ 以上になると、図5(b)に示すようにイースト菌は電極のエッジ部ならびにガラスビーズ表面に捕集された。菌がガラスビーズ表面に捕集される場合、菌が単独で捕集されるよりも、予めパールチェインを形成した状態で流れてきた複数の菌がまとめて捕集されることが多かった。菌は主に隣り合うガラスビーズの接触部付近に捕集され、この位置は図2の電界計算結果で電界が最大となる位置にほぼ一致している。最も電界が集中する電極エッジへの菌捕集も観察されたことを考え合わせると、菌捕集は正の誘電泳動力によるものと考えられる。捕集される菌数は時間と共に増加し、電圧が高いほど捕集速度は速くなつた。また、懸濁液の流量が $100mL/h$ 以上になると、菌捕集は抑制された。これは、流速上昇により粘性抵抗力が誘電泳動力を上回つたためであると考えられる。菌捕集後に電圧をゼロに急落させると、捕集された菌が懸濁液中へ一気に放出される様子が確認された。以上より、提案した誘電泳動フィルタは原理的に動作可能であり、誘電泳動力の分布は2章で示した電界計算からの予想とほぼ一致することが確認された。

##### 4.2 懸濁液導電率の影響

本研究で処理対象液体とした水は、油などの絶縁性液体に比べると一般に導電率が高い。誘電泳動フィルタで高導電率の液体を処理する場合、ジュール発熱によって液体温度が上昇することが予想される。ジュール発熱によって

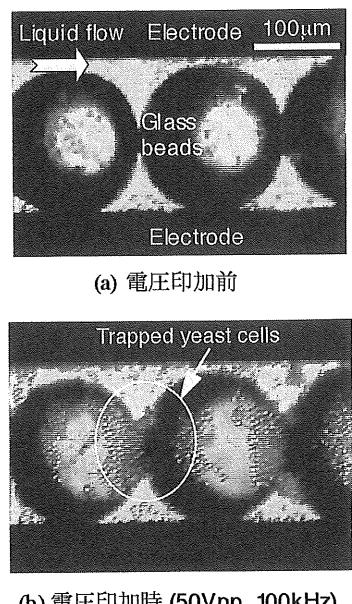


図5 モデル電極系内におけるイースト菌捕集状況  
Fig.5 Collection process of yeast cells in a model electrode.

フィルタ内部で液体の対流が発生すると、懸濁異物には対流による粘性抵抗力が作用するため、誘電泳動力による捕集の妨げになることが危惧される<sup>8)</sup>。また、本研究で捕集対象としたイースト菌のような微生物は、約 $60^{\circ}\text{C}$ 以上に加熱すると時間と共に活性を失うため、培養法による菌数測定を正確に行うことができない。更に、(1)式、(2)式からも明らかなように、異物に作用する誘電泳動力も懸濁液導電率に依存するので、ジュール発熱が小さい場合であっても、その影響を十分に考慮する必要がある。

##### 4.2.1 ジュール発熱への影響

誘電泳動フィルタは図1に示したようにその内部に多数の誘電体粒子を含んでいるため、その内部の電流経路は複雑であり、その抵抗 $R_F$ を理論的に求めることは容易ではない。しかしながら、その構造や大きさが一定であれば、 $R_F$ は懸濁液の導電率 $\sigma_m$ に逆比例し、ジュール熱 $E_J = V_{rms}^2 / R_F$ による電圧印加開始後の時間 $t$ における温度上昇 $\theta(t)$ は次式で与えられる。

$$\theta(t) = A \sigma_m V_{rms}^2 \{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (4)$$

ここで、 $V_{rms}$ は印加電圧の実効値、 $A$ と $\tau$ はフィルタの構造、大きさ、懸濁液体や周囲媒質の種類に依存する定数である。懸濁液導電率を変化させて、フィルタ出口における懸濁液温度の時間変化を測定した結果を図6に示す。同図中には、 $\sigma_m$ をパラメータとして(4)式から計算した温度変化も併せて示している。同図より、懸濁液の温度上昇はほぼ(4)式にしたがい、その最終到達温度は $\sigma_m$ に比例することがわかる。以上の結果を考慮して、誘電フィルタの実験では、懸濁液導電率 $\sigma_m$ を $0.2\sim 1\text{mS/m}$ の範囲に設定した。この場合の懸濁液フィルタ温度上昇は図6からわかるように約 $15^{\circ}\text{C}$ 以下であり、対流の発生やイースト菌の失活は起こらないものと考えられる。

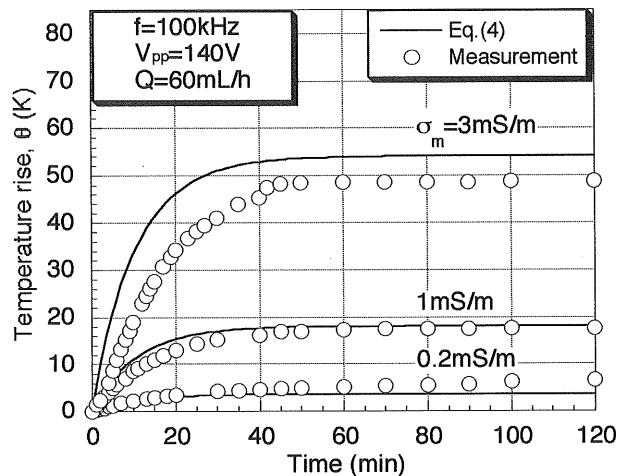


図6 フィルタ出口における懸濁液温度の経時変化

Fig.6 Temporal variation of suspension liquid at filter outlet.

#### 4.2.2 誘電泳動力への影響

イースト菌を細胞壁、原形質膜、原形質からなる三層構造の球形誘電体粒子でモデル化することにより、表1に示す各部の典型的な物性値を用いて菌全体の実効的な複素誘電率  $\epsilon_{\text{eff}}^*$  を算出することができる<sup>9</sup>。 (2)式の  $\epsilon_p^*$  を  $\epsilon_{\text{eff}}^*$  に置き換えて  $\text{Re}[K]$  の周波数依存性を懸濁液導電率  $\sigma_m$  をパラメータとして計算した結果を図7に示す。本研究で実験を行った周波数 100kHz の条件下では、 $\sigma_m$  が 10mS/m 以上になると  $\text{Re}[K]$  即ち誘電泳動力が著しく低下することがわかる。しかしながら、前述したようにジュール発熱を抑制するために懸濁液導電率  $\sigma_m$  を 1mS/m 以下に設定した場合、誘電泳動力の低下は殆どないことがわかる。

#### 4.3 誘電泳動フィルタの基本特性

フィルタ入口の菌濃度を  $10^6 \text{ cells/mL}$  一定として、フィルタ出口における菌濃度の時間変化を電圧印加の有無の条件下で測定した結果を図8に示す。電圧を印加しない場合、菌濃度は入口濃度とほぼ同じ値のままであり、菌除去が行われていないことがわかる(A領域)。次に電圧を印加すると、濃度は約 60 分で初期濃度の  $10^6 \text{ cells/mL}$  から  $10^1 \text{ cells/mL}$  の

表1 誘電泳動スペクトル計算に用いた各定数<sup>9</sup>

Table 1 Parameters for numerical calculation.

Component	Parameter	Typical value
Cytoplasm	Relative permittivity	50
	Conductivity	200mS/m
	Radius	4μm
Membrane	Relative permittivity	6
	Conductivity	0.25μS/m
	Thickness	8nm
Cell wall	Relative permittivity	60
	Conductivity	14mS/m
	Thickness	0.22μm
Medium(Water)	Relative permittivity	80
	Conductivity	0.2mS/m

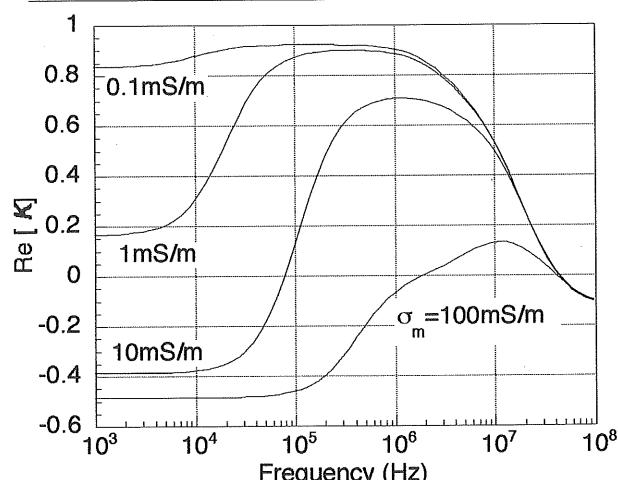


図7 イースト菌の  $\text{Re}[K]$  の周波数特性に及ぼす媒質導電率の影響

Fig.7 Effects of suspension liquid conductivity on  $\text{Re}[K]$  spectra of a yeast cell.

オーダにまで減少し、その後はほぼ一定となった(B領域)。これは、除去率 99.99% に相当する。図5に示したモデル電極系での観測結果を考慮すると、この濃度低下は正の誘電泳動力によってガラスビーズ表面の電界集中部に菌が捕集されたためであると考えられる。最後に電圧を零に戻すと、菌濃度は一旦入口濃度の約 5 倍まで急増し、その後入口濃度と同じ値となった(C領域)。これは、B 領域でガラスビーズ表面に捕集されていた菌が一斉に懸濁液中に再放出されたことを示している。

4.1 節でも述べたように、菌捕集プロセスにおいては、個々の菌が個別にガラスビーズ表面に泳動されるよりも、既にパールチェイン状に集塊した菌がまとまって捕集される場合が多かった。このことから、フィルタに流入する菌の初期濃度が低い場合には、菌の集塊が起こりにくいため菌捕集が抑制され、フィルタ性能が低下することも考えられる。そこで、図8のB領域における特性をフィルタ入口の菌濃度を変化させて測定した結果を図9に示す。同図より、相対的な濃度低下割合は、初期濃度によらずほぼ一定であり、誘電泳動フィルタは初期濃度が  $10^6 \text{ cells/mL}$  以上であれば、有効に動作することが確認された。フィルタを実際に使用する場合、その出口における菌濃度を一定値以下にまで低減することが要求されるが、図9の結果より初期濃度が低いほど、短時間で出口濃度を一定レベル以下に低減できることがわかる。例えば、濃度  $10^3 \text{ cells/mL}$  の場合は約 5 分で検出下限 ( $10^1 \text{ cells/mL}$ ) 以下にまで減少するのに対して、濃度  $10^6 \text{ cells/mL}$  の場合は約 45 分を要する。

誘電泳動フィルタに更に長い時間懸濁液を流し続けて、フィルタ出口の菌濃度を測定した結果を図10に示す。処理開始後 1 時間までは菌濃度は減少し続けるが、1 時間を経

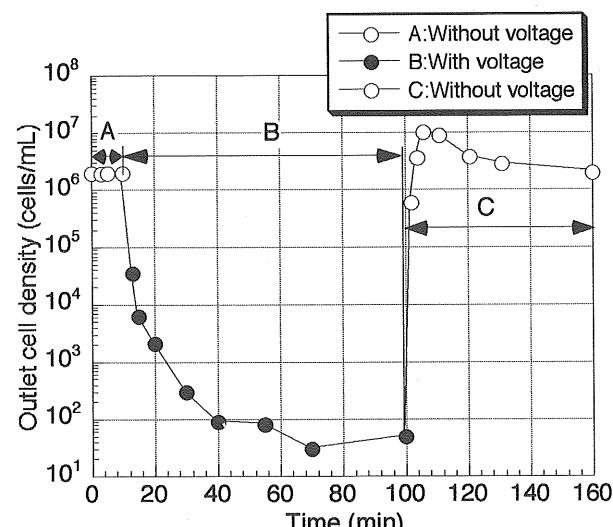


図8 誘電泳動フィルタ特性の電圧依存性

Fig.8 Temporal variation of cell density at filter outlet.

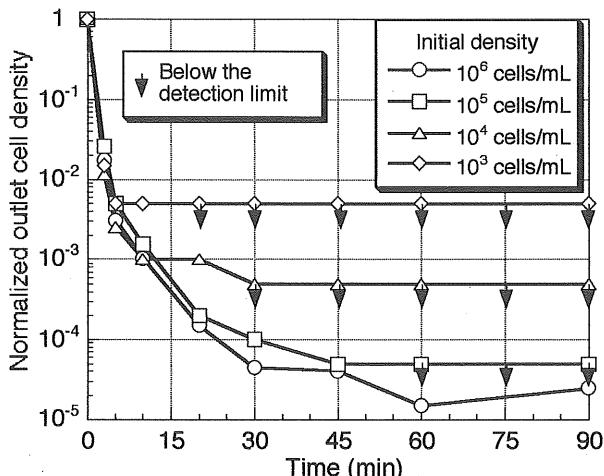


図9 誘電泳動フィルタ特性の初期濃度依存性  
Fig.9 Effects of initial cell density on the filter performance.

過すると菌濃度は徐々に増大し、17時間後には入口での菌濃度と同じになった。即ち、この状態ではフィルタに流入したイースト菌は全く捕集されずに、そのまま出口に流出していることになる。誘電泳動フィルタにこのような捕集限界が存在する理由は、図2の電界計算結果および図5に示したモデル電極系での観測結果から以下のように説明できる。誘電泳動フィルタ内部において正の誘電泳動により菌が捕集されるのは、ガラスビーズ表面上の電界集中部に限られている。捕集が進むにつれてこの部分は捕集された菌で徐々に覆われていくため、菌を捕集できる領域は徐々に減少し、最終的には菌の捕集ができなくなるものと考えられる。しかしながら、このような場合にも電界が弱い部分には菌は捕集されず、この部分が懸濁液の流路として残るため、フィルタ全体として目詰まりが起こるようなことはない。ところで、図8に示したように、誘電泳動フィルタでは電圧制御によって捕集した異物粒子を容易に放出できる。この特徴を利用すれば、フィルタを簡単に「セルフクリーニング」して再利用することができるため、複数のフィルタを並列に接続し捕集限界に達したフィルタを順次オフラインで洗浄するようすれば、上記の捕集限界の問題は解決することができるであろう。

## 5.まとめ

本論文では、誘電泳動現象を利用して液体中の懸濁異物を除去する誘電泳動フィルタを提案し、その動作原理、捕集過程の観察結果ならびに基本的な異物除去特性について述べた。主な結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 多数の誘電体粒子を電極間に充填することにより、多数の電界集中部を形成しこの部分に正の誘電泳動力をを利用して異物を捕集することができる。
- (2) イースト菌懸濁液を試料液体とし、モデル電極系を用いて正の誘電泳動力による菌捕集ならびに再放出の

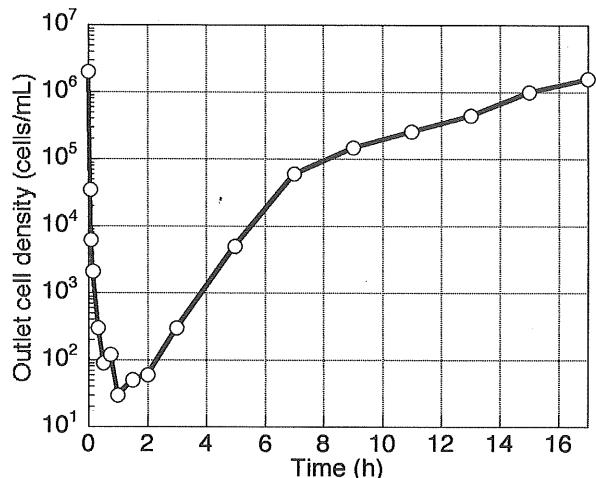


図10 誘電泳動フィルタの長時間動作特性  
Fig.10 Long term performance of the dielectrophoretic filter.

過程を観察することができた。

- (3) 約100万個のガラスビーズを充填したフィルタを試作し、イースト菌の除去特性を測定した。その結果、初期濃度10^6 cells/mLの場合、約1時間で99.999%のイースト菌を除去することができた。
- (4) 長時間連続して運転した場合、誘電泳動フィルタ内部の捕集領域が減少するため徐々に除去率は低下し、最終的には全くフィルタとして機能しなくなる。しかし、この場合に目詰まりが起こることはない。

本論文では、試料液体としてイースト菌懸濁液を用いたが、捕集に必要な正の誘電泳動力が得られる条件下であれば、その他の液体と異物粒子の組合せ(例えば油中の金属粒子やエマルジョン化した微小水滴)に対しても誘電泳動フィルタを応用することが可能と予想される。また、充填する誘電体粒子の形状や物性値を最適化することによって、更に効率よく異物除去が行える可能性がある。これらは、異物粒子の挙動・捕集過程の更に詳細な検討と共に今後の検討課題としたい。

## 参考文献

- 1) 周広斌、今村学、末廣純也、原雅則：静電気学会講演論文集'01, p.55, 静電気学会(2001)
- 2) G. H. Markx and R. Pethig: Biotechnol. Bioeng., **45** (1995) 337
- 3) A. Docolis, N. Kalogerakis, L. Behie and K. Kaler: Biotechnol. Bioeng., **54** (1997) 239
- 4) M. Washizu, T. Nanba and S. Masuda: IEEE Trans. Ind. Appl., **26** (1990) 352
- 5) 飛栖虎男：潤滑通信, **2** (1986) 32
- 6) H. A. Pohl: *Dielectrophoresis*, p.35, Cambridge Univ. Press (1978)
- 7) T. B. Jones: *Electromechanics of Particles*, p.29, Cambridge Univ. Press (1995)
- 8) N. G. Green, A. Ramos, A. Gonzalez, A. Castellanos and H. Morgan: J. Electrostatics, **53** (2001) 71
- 9) Y. Huang, R. Holzel, R. Pethig and X. Wang: Phys. Med. Biol., **37** (1992) 1499