

酵母菌の増殖・発酵過程における 電気インピーダンスの変化

正員 三池 秀敏[†] 正員 三角 博好[†] 非会員 有田 英徳[†]
正員 橋本 基[†] 正員 蛭名 良雄[†]

Change of Electrical Impedance in Growth and
Fermentation of Yeast

Hidetoshi MIIKE[†], Hiroyoshi MISUMI[†], *Members*, Hidenori ARITA[†],
Nonmember, Hajime HASHIMOTO[†] and Yoshio EBINA[†], *Members*

あらまし 酵母菌の増殖・発酵に伴う培養液のインピーダンスは腸内細菌などとは異なり、pHが減少するにもかかわらず増加の傾向を示す。本研究では、まずこの主な原因は菌体自身の存在が電流を運ぶキャリアの運動を妨げているためであることを明らかにした。一方、菌増殖を伴わない発酵過程におけるインピーダンスは逆に減少することを確かめ、この主な原因はグルコースがエタノールに変換されることによるものであり、インピーダンス減少量は発酵エタノール量との間に強い相関があることを示した。

1. ま え が き

従来、微生物の増殖をモニタする方法の一つとして培養液のインピーダンス計測が行われており、多くの場合微生物の増殖に伴い、その酸性代謝物の増加により溶液の抵抗分 R が減少することや、電極表面に付着する分子の変化により容量分 X_c が増加することが知られている⁽¹⁾。いずれも溶液のインピーダンスを減少させる効果を持つが、通常 R の変化より X_c の変化が顕著である。しかし X_c は電極表面の状態に大きく左右されるため、通電電極を測定電極とする2電極法では計測されるインピーダンスの再現性が悪い。そこで我々は細菌の発育をモニタする方法として、定電流の条件下での4電極計測法を提案し、培養液のインピーダンスが純抵抗性として計測され、その変化が再現性良く連続モニタできることを示してきた^{(2),(3)}。

ところで酵母菌の増殖・発酵に伴うインピーダンス変化は、通常の微生物の場合と異なり増加する場合があることがCadyにより報告されている⁽¹⁾。しかも、その変化が培養液中のグルコース濃度により増加したり、減少したりするという興味ある結果が示されている。

我々はこのような振舞いは、2電極法が用いられていることから、電極表面の変化と培養液中の変化という質の異なる現象が混在することに起因するのではないかと考え、提案してきた4電極法を用いた研究を行って来た。その結果、培養液のグルコース濃度によらずすべての場合について、酵母菌の増殖・発酵に伴い培養液のpHは減少するにもかかわらず培養液のインピーダンス（純抵抗性）が増加することを確認し、先に報告した⁽⁴⁾。またその中で、インピーダンス変化の立ち上がりとエタノール発酵の始まる時期がほぼ一致していることや、インピーダンス増加の飽和値（20時間後の変化量）と発酵エタノール量との相関が強いことを示した。しかし、計測されるインピーダンス変化のばらつきが比較的大きく、その再現性も不十分であった。そこで本報告では、従来用いていたステンレス・スチール（SS）線電極に変えて、より信頼性の高い白金線電極を使用しデータの蓄積を行うとともに、インピーダンスの増加の原因やインピーダンス変化と発酵エタノール量の関係を明らかにするため、種々の条件下で発酵を行わせ、その発酵過程におけるpHおよび濁度の変化を同時に計測した。

2. 実験方法

実験で使用したシステムのブロック図を図1に示す

[†] 山口大学工学部電気工学科, 宇部市
Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube-shi,
755 Japan

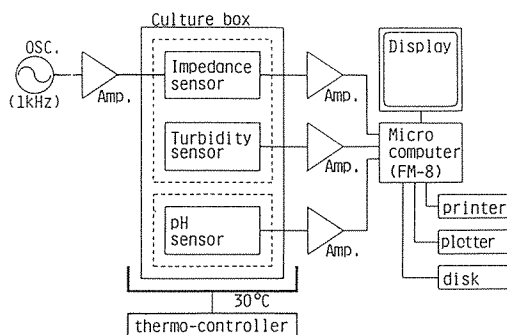


図1 実験システムのブロック図

Fig.1 The block diagram of the experimental system.

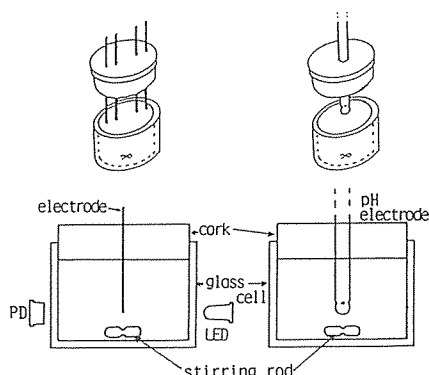


図2 培養セルおよび各センサの配置

Fig.2 Cultivation cells and arrangement of sensors.

培養箱内にはインピーダンス、濁度、pHの各センサがあり、それらのデータは増幅器、A/D変換器等の電子回路を通してマイクロコンピュータにより同時計測され適宜処理される。また培養箱内は温度コントローラで $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 一定に保たれている。図2では培養セル、インピーダンス測定用電極、濁度センサ、pH電極のそれぞれの形状、配置を示している。インピーダンスは図に示すように4電極法で測定する。発振器から1 kHz、 $4 V_{p-p}$ の電圧を定電流回路を通して外側の電極にかけ内側の電極の電位差を測定することによりインピーダンスを計測した。このとき電流は0.14 mA一定である。電極は従来用いていたSS線のかわりに0.7 mmφの白金線を使用した。4電極法を用いることで、電極表面の電気二重層の影響をほとんど受けず溶液自体のインピーダンス(純抵抗性)が測定できることや、使用電極の材質にはあまり左右されない

表1 GPYE液の各成分

成分	濃度	単位
Yeast extract	6	g/l
Glucose	0~100	g/l
Peptone	1	g/l
NaCl	3	g/l
MgSO ₄	0.4	g/l
(NH ₄) ₂ SO ₄	1.3	g/l

ことを先に報告しているが⁽²⁾、その後のデータ蓄積により白金、金、SSの中では白金が最もよい再現性を示すことを確認している。濁度は発光ダイオードからの光を透過させ、その透過光をフォトダイオードで光電変換して測定した。濁度は良く知られているように、液中の菌量(=菌数×菌体の体積)を反映している。pHは既製のpHメータ(TOA Model HM-6a GS-195C)で測定を行った。実験ではセルは二つ用意され、一方にインピーダンスおよび濁度、もう一方はpHのみを同じ条件下で同時計測するようにしている。またセル内にはかくはん棒を入れ培養中常にかくはんした。

実験で使用した菌は*Saccharomyces cerevisiae*で主な培養液はGlucose, Pepton, Yeast Extractなどを含むGPYE液である。GPYE液の成分の詳細は表1に示した。実験では菌を一夜培養(20時間)した溶液を設定したい初期菌数の濃度に希釈し、その液から15 mlを培養セルに入れ測定を行った。測定はセル内の温度がほぼ平衡状態になった後(30分後)に開始され、インピーダンス、濁度、pH変化を十分ごとに20時間連続的に計測した。

3. 結果および議論

3.1 増殖・発酵に伴うインピーダンス、濁度、pHの変化

図3に接種菌濃度を飽和菌濃度の1/100として、酵母菌の増殖・発酵に伴う各量の変化を測定した結果を示す。図にプロットしてある発酵エタノール量は、同じ条件下で培養した液から蒸留・比重法により定量したものである。このときのGPYE中のグルコース濃度は50 g/lである。図は培養液のインピーダンスがpHが減少しているにもかかわらず増加していることを示している。なお、このときのインピーダンスは増殖・発酵の過程を通して純抵抗性であることを確認している。前述の通り通常の微生物のインピーダンス

は、その酸性代謝物の影響により減少することが知られており、この結果はそれと相反している。ここで、インピーダンス変化のピークまでの曲線と濁度の変化曲線との間には強い正の相関が見られることから、インピーダンス増加は濁度増加すなわち菌量増加に関係があることがまず考えられる。先の報告では⁽⁴⁾、今回の結果に比べてインピーダンス増加の立ち上がりが、かなり遅れ、むしろエタノール発酵の開始時期に近かったことから、インピーダンスの増加と発酵エタノール量の間になんらかの相関があると解釈していた。しかし今回、電極材質をSSから白金にかえたことで、インピーダンスの立ち上がりが早く観測されるようになり、再現性も高まった。すなわち、SSでは十分電極表面の効果が押えられない場合があると考えられる。この結果からは、先の報告での解釈はあやまりで、増殖・発酵過程の初期におけるインピーダンス変化はむしろ濁度変化と相関が強いことが伺える。

一方、インピーダンス変化のピーク時点(約8時間後)以降、インピーダンスは逆に減少する傾向を示している(図3)。この傾向も先の報告では、より高いグルコース濃度(100 g/l)で観測されていたものの、同一条件下(50 g/l)では不明瞭であった。やはり電極材料をSSから白金にかえ、データの信頼性が高まったことにより顕著となったと考えられる。またこの時点で濁度は飽和しつつあり、発酵エタノール量は増え始めている。濁度が飽和することは培養液内の酵母菌数が飽和菌濃度に達することであるが、菌量が飽和に近づくと培養液は嫌気的狀態に推移し、その結果、菌の代謝は呼吸から発酵の状態へと変わると考えられる。発酵エタノール量が濁度曲線の飽和時点以降に増加し始めているのはこのことを反映したものと考えてよいであろう。このエタノールの増加開始時期にちょうど位相を合わせてインピーダンスが減少を始めていることから、発酵エタノール量とインピーダンスの減少量の間にはなんらかの相関があることが推測される。すなわち、図3の結果から次の二つの仮説が設定される。

- (1) 酵母菌の増殖、発酵の初期にみられるインピーダンス増加は菌量の増加に関係している。
- (2) 菌量の飽和以後に見られるインピーダンス減少の傾向は発酵エタノール量の増加と相関がある。

以下、これらの仮説の確認および原因追求の実験結果について述べる。

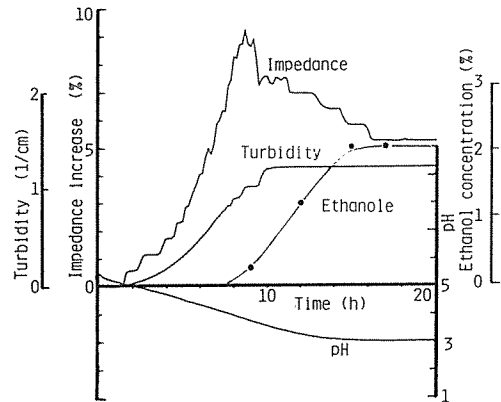


図3 GPYE液におけるイースト菌の増殖と発酵に伴うインピーダンス、濁度、エタノール、pHの時間変化。インピーダンスの初期値は187Ωである。

Fig.3 Time courses of impedance, turbidity, ethanol and pH with growth and fermentation of yeast in GPYE broth. Initial value of impedance is 187Ω.

3.2 インピーダンス増加と菌の増殖との相関

仮説1の確認のため、菌の増殖を伴う場合と伴わない場合の発酵実験を行った。このとき培養液として、GPYE液の構成成分のうち発酵と菌増殖に直接関係するグルコース(以下GLと略す)およびイーストエキス(以下YEと略す)だけを取り上げ、これに各々生理塩濃度のNaClを加えて培養液として用いた。いずれも初期菌数は飽和菌濃度の1/2(約 10^8 cfu/ml)とし、発酵がただちに始まる状態とした。ここでYEは菌体の増殖に必要なタンパク質、脂質、ミネラル等を含むため、YEの入っている溶液では菌の増殖と発酵が平行して行われる。YEの入っていない溶液では菌の増殖はなく発酵のみが進む。菌の増殖がなく発酵のみ行われる場合、すなわち培養液をNaCl+GLとした場合には図4に示すように、濁度、pHはほぼ一定でインピーダンスのみが時間とともに減少している。一方増殖が発酵と同時に進む場合、すなわち培養液をNaCl+GL+YEとした場合には、図5に示すようにインピーダンスは培養の初期において急速に増加し、濁度(菌量)もその期間、時間とともに増加している。これらの結果はインピーダンスの増加の原因の一つを明確に示唆しており、今まで行った多くの実験でYEが入っている場合にのみ観測されるインピーダンスの増加は、菌体の増殖あるいはこれに伴う代謝に直接関係していると結論できよう。

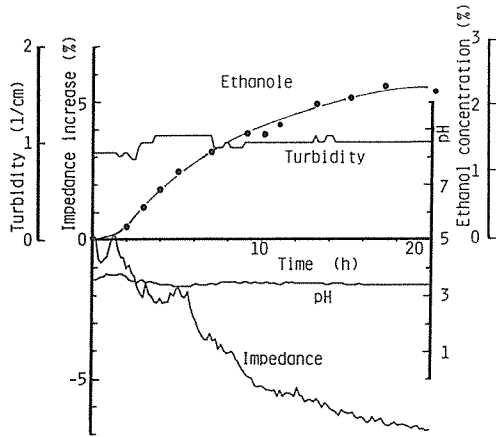


図4 NaCl+Glucose 培養液における酵母菌の発酵に伴うインピーダンス, 濁度, pHの時間変化。インピーダンスの初期値は275Ωである。

Fig.4 Time courses of impedance, turbidity and pH with yeast fermentation in NaCl + Glucose broth. Turbidity shows little increase of yeast cells and the impedance is decreased. Initial value of impedance is 275 Ω.

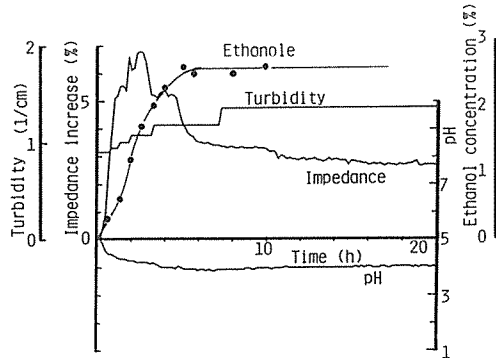


図5 NaCl+Glucose+YE 培養液における酵母菌の増殖, 発酵に伴うインピーダンス, 濁度, pHの時間変化。インピーダンスの初期値は201Ωである。

Fig.5 Time courses of impedance, turbidity and pH with growth and fermentation of yeast in NaCl + Glucose + YE broth. In this case, turbidity shows clear increase at the early stage of cultivation. Initial value of impedance is 201 Ω.

3.3 インピーダンス増加の原因

Cady⁽¹⁾は酵母菌の増殖に伴うインピーダンスの増加は, 菌が代謝により非イオン性の栄養物をイオン化するより, 媒質から細胞質内にイオン性物質を取りこむ

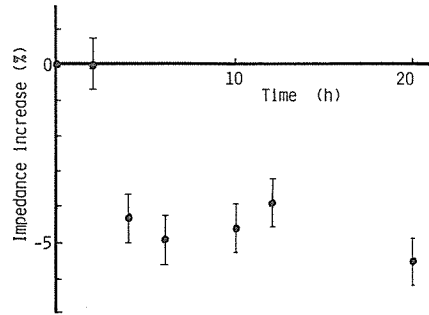


図6 酵母菌を除いた発酵液のインピーダンス変化。イースト菌は遠心分離とろ過により除かれた。縦棒はインピーダンスの測定誤差を示す。インピーダンスの初期値は191Ωである。

Fig.6 Time course of impedance of GPYE broth without yeast cells in growth and fermentation process. Yeast cells were removed by centrifugalization and filtering. Vertical bars indicate error of measured impedance. Initial value of impedance is 191 Ω.

効果が強いと説明している。このことを確認するため, 増殖, 発酵中の培養液から菌体を取り除き, 残りの培養液のインピーダンスの時間変化を計測した。測定結果を図6に示す。実験条件は図3の場合と同様である。実験では同時に20本の試験管を用い, 同一条件下で培養を行った。菌体を除くため適当な時間ごとに培養液を遠心分離し, 更には上ずみをろ過した。そのろ過液をインピーダンス計測の試料とした。図に示すように菌増殖に伴いインピーダンスは明らかに減少しており, 図3の結果とは異なっている。これは菌体を含む培養液のインピーダンスの増加の原因がCadyが指摘したような培液中のキャリアの減少効果ではなく, 溶液中に存在する菌量の増大によっていることを示唆している。すなわち, GPYE液で酵母菌を増殖させた場合のインピーダンス増加の主因は, 溶液中のキャリア(イオン性物質等)の減少効果があっても小さく, 一種の散乱体としての菌体の増加が電流を運ぶキャリアの運動を妨げていることによると考えられよう。

更に上記の考えを確認するため, 計測中の菌数を一定に保つ培養液として3g/lのNaCl溶液に飽和菌濃度の1/100, 1/20, 1/2の菌体を入れそれぞれの場合のインピーダンスを測定しプロットした結果を図7に示す。予想どおり菌濃度が増すごとにインピーダンスも増加している。これは菌体がキャリアの一種

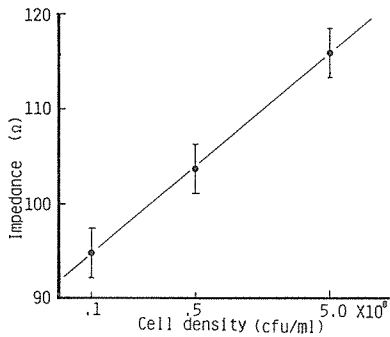


図7 インピーダンスと菌量の関係。縦棒はインピーダンスの測定誤差を示す。

Fig.7 The relation between impedance and cell density in the broth. Vertical bars indicate error of measured impedance.

の散乱体となって電気抵抗を上げている証拠であるといえる。なお、図は飽和菌濃度を約 10^9 cfu/mlとして示している。ここで溶液中のキャリアの主役は種々のイオン (Na^+ , Cl^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} ...) であり、そのイオン半径に比べてはるかに大きい酵母菌自体が散乱体となっているというのは少し奇異に感じられる。実際には酵母菌の菌体自身が絶縁体とみなせるため、電流通路の断面積が等価的に減少していることが考えられる。

なお、菌増殖に伴い、呼吸代謝量の増加による酸性代謝物の増加は pH の減少としてあらわれている。このことは菌量変化を示す濁度変化曲線と pH 変化曲線との相関が強い (図3参照) ことから確認できる。この酸性代謝物の産出 (キャリアの増大) によりインピーダンスは減少する傾向を示すはずであるが、上記の菌体の急増に伴うキャリアの一種の散乱効果がまざっているため表面に顕われてこないものと考えられる。この考えは図6の測定結果にみられるように、菌体を除いた培養液のインピーダンスが菌増殖・発酵に伴い減少することや、その変化が既に増殖の初期に顕われていることと合致している。

3.4 インピーダンス減少と発酵エタノールとの相関

YEがない場合 (菌の増殖が行われない場合)、発酵の進展に伴いインピーダンスが減少することを示した (図4)。この場合のインピーダンスの減少率と発酵エタノール量との関係を図8に示す。実際は図4のインピーダンス変化の結果を縦軸をインピーダンス減少率として描き直したものである。図は最終値がほぼ一致するものと仮定して描いている。実験条件は図4

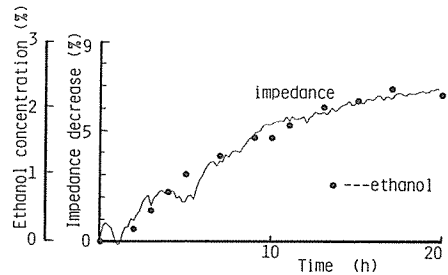
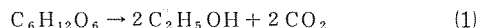


図8 菌の増殖のない時の発酵に伴うインピーダンスとエタノールの時間変化。発酵エタノールとインピーダンスの間に強い相関が見られる。このときの相関関数は0.98であった。インピーダンスの初期値は 275Ω である。

Fig.8 Time course of impedance and ethanol with yeast fermentation in NaCl + Glucose broth. The fermented ethanol is closely correlated to the decrease of impedance of the broth. The correlation coefficient is 0.98. Initial value of impedance is 275Ω .

の場合と同じである。図で黒丸でプロットしてあるのは発酵エタノール量の時間変化で、蒸留・比重法により求めたものである。この図よりインピーダンスの減少率と発酵エタノール量との間には強い正の相関が見られる。このときの相関係数は0.98であった。ここでインピーダンス減少曲線の最終値が7%付近になっている。ところで、発酵プロセスにおけるGLからエタノールの変換は、次のように与えられる⁽⁵⁾。



そこで、完全にGLがエタノールに変換されたとすると、今の場合、理論的に生産されるエタノール量がわかる。そのエタノール量をNaCl溶液に加えたものとNaCl + GL溶液のインピーダンスを測定し両者を比較した。NaCl + エタノール溶液の場合がNaCl + GLに比べて7.8%インピーダンスが低くなった。この値は図4のインピーダンス減少率の最終値が約7%であることとほぼ一致しており、発酵に伴うインピーダンスの減少の原因はGLがエタノールに変換されることが主因と考えて良いことを支持している。発酵に伴う炭酸ガスの発生による溶液の酸性化もインピーダンス減少の原因の一つと考えられるが、この影響は小さいことを確認している。以上より、インピーダンスの減少曲線は発酵過程におけるエタノール量の時間変化を反映することになり、菌量が一定の条件下で行われる発酵プロセスにおいては溶液インピーダンスの連続計測が発酵エタノール量の連続モニタ法として有効である

表2 酵母菌の増殖・発酵に伴う培養液インピーダンスの増加および減少の原因

インピーダンス変化	原因	時期	影響度	pHへの影響
減少	1. 酸性代謝物の生産	増殖期	中	大
	2. CO ₂ の発生	増殖および発酵期	小	小
	3. 発酵に伴うグルコースのエタノールへの変換	発酵期	大	なし
増加	1. 菌体によるキャリヤイオンの伝導障害	増殖期	大	なし
	2. 菌体によるイオン性栄養物の取り込み	増殖期	小	なし

ことが考えられる。特に近年の発酵プロセスは菌体を固定化する方法が広く行われるようになってきている^{(6)~(8)}。この場合、菌が完全に固定されていれば、周囲の培養液中に菌は存在せず、固定された媒体中で菌は盛んに発酵を行う。ここで提案した方法は、このような菌固定の発酵プロセスにおける発酵エタノール量の連続モニタの可能性を示唆している。

ところで、現在酵母菌の発酵過程での発酵エタノール量をモニタする方法は、酵素電極法^{(9)~(11)}、微生物電極法⁽¹²⁾、蒸留法などバッチ的方法が主流である。発酵槽に直接挿入し連続的に発酵エタノール量を計測する方法としては、チュービング法が知られるのみである^{(13)~(15)}。この方法はシリコンゴムのチューブを通してくる気体の組成変化より、発生気体を検出する。チューブ自身に気体の選択性はないのでエタノール検出センサを別に用意する必要がある。我々の方法では発酵させる条件に制約(菌数一定)を加えれば、エタノール量の変化のみを計測できることや、センサの構造も簡単で、電極材質に白金を用いていることから加圧滅菌も可能で、繰返しの使用に耐えデータの再現性もよいなどの利点がある。今回、発酵原料としてグルコースのみを用いているので明確なことは言及できないが、同時計測しているpHや濁度の情報を十分活用することで、実際の発酵プロセスのモニタ法として発展させることが可能であろう。

4. む す び

以上述べてきたように酵母菌の増殖および発酵に伴い、培養液のインピーダンスに影響を与える要因は数多く存在している。ここで改めて、考えられるインピーダンスの増加原因と減少原因を列記し、その要因が働く条件、時期および影響度の大小を表2にまとめている。すなわち、菌の増殖が主要な時期(初期)では、

菌体の増加によるキャリヤの散乱効果の増大と酸性代謝物の蓄積によるキャリヤの増大が競合するが、前者の効果が顕著で結果として培養液のインピーダンスは増大する。一方、発酵が主要な時期(後期)ではGLがエタノールへ変換されるとともに、一部菌増殖に伴う酸性代謝物の蓄積、更には発酵に伴うCO₂の発生による培養液の酸性化が相加的に働きインピーダンスが減少傾向を示すと考えられる。菌量が一定の条件下での発酵過程では、菌増殖に伴う散乱効果や酸性代謝物の変化の影響はなく、表2からも推察できるように培養液のインピーダンス変化は主として発酵エタノール量を反映することになる。

最後に本報告で得られた知見を以下に簡条書に示す。

- 1) 酵母菌の増殖・発酵過程におけるインピーダンスは、pHが減少するにもかかわらず増加の傾向を示す。この傾向は、培養初期の増殖過程において顕著であり、菌量を示す濁度変化との相関が強い。
- 2) インピーダンスの増加の原因を追究した結果、溶液中のキャリヤの減少ではなく、菌体の増加による一種の散乱効果が主因と考えられる。
- 3) 菌増殖の行われない状態では発酵に伴い培養液のインピーダンスは減少する。その主な原因はGLがエタノールに変換されることによるものであり、インピーダンスの減少量と発酵エタノール量との間に強い相関がある。

謝辞 本研究を行うにあたり、実験上の手助けを頂いた浅芝慶弘氏、および装置作成において多大なる御協力を賜った谷戸宗吉氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) P.Cady: "Mechanizing Microbiology", Charles C. Thomas, Springfield, pp. 199-239 (1978).
- (2) 木吉, 橋本, 三池, 鯉名, 宮地: "細菌培養下にお

ける培養液の電気インピーダンス計測”, 医用電子と生体工学, 19, 1, pp. 35-39 (1981).

- (3) 橋本, 三池, 蛭名, 宮地: “濁度および電気インピーダンスの同時計測による自動細菌検査法”, 医用電子と生体工学, 19, 1, pp. 23-29 (1981).
- (4) H.Miike, Y.Asashiba, H.Hashimoto and Y.Ebina: “Study of the electrical impedance in the ethanol fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 23, pp. 386-387 (1984).
- (5) 山口, 山口: “最新応用微生物学入門”, pp. 76-89, 技報堂出版 (1980).
- (6) M.Wada, J.Kato and I.Chibata: “Continuous production of ethanol in high concentration using immobilized Growing cells”, *European J. Appl. Microbial Biotech.*, 11, pp. 67-71 (1981).
- (7) S.S.Lee and H.Y.Wang: “Repeated fed-batch rapid fermentation using yeast cells and activated carbon extraction system”, *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, 12, pp. 221-231 (1982).
- (8) M.Nagashima, M.Azuma, S.Noguchi and K. Inuzuka: “Continuous ethanol fermentation using Immobilized yeast cells”, *Biotechnol. Bioeng.*, 26, pp. 992-997 (1984).
- (9) J.P.Kerneuez, L.Konate and L.Romett: “Determination of substrate concentrations by a computerized enzyme electrode”, *Biotechnol. Bioeng.*, 25, pp. 845-855 (1983).
- (10) C.Verduyn, J.P.Van Duken and W.A.Scheffers: “A simple, sensitive, and accurate alcohol electrode”, *ibid.*, pp. 1049-1055.
- (11) 山根恒夫: “発酵プロセスのセンシング”, *センサ技術*, 3, 2, pp. 52-56 (1983).
- (12) K.Dairaku and T.Yamada: “Use of the porous teflon tubing method to measure gaseous or volatile substances dissolved in fermentation liquids”, *Biotechnol. Bioeng.*, 21, pp. 1617-1676 (1979).
- (13) T.Yamane, M.Matsuda and E.Sada: “Application of porous teflon tubing method to automatic fed-batch culture of microorganisms. 1. Mass transfer through porous teflon tubing”, *Biotechnol. Bioeng.*, 23, pp. 2493-2507 (1981).

(昭和60年11月8日受付, 61年3月31日再受付)



三池 秀敏

昭46九大・工・電子卒。昭51同大学院博士課程電子工学専攻単位取得退学。同年山口大・工・助手。現在、同助教授。画像計測, 光散乱計測法に関する研究に従事。工博。電気学会, 日本ME学会, 日本物理学

会各会員。



三角 博好

昭59山口大・工・電気卒。昭59同大学院入学, 以来, 酵母菌の発酵過程のセンシングの研究に従事。



有田 英徳

昭60山口大・工・電気工学科卒。同年三菱電機入社。現在北伊丹製作所にて, 半導体プロセス関係の仕事に従事。



橋本 基

昭52山口大・工・電気工学科卒。昭54同大学院修士課程了。同年同大学電気工学科助手。以来, 主に電気インピーダンス計測, 光散乱計測の研究に従事。日本ME学会, 応用物理学会各会員。



蛭名 良雄

昭34東北大・工・電気科卒。昭36同大学院修士課程了。同年電電公社入社。昭37東北大学電気通信研究所を経て現在山口大・工・教授。生体計測の研究に従事している。日本ME学会, 生物物理学会, 応用物

理学学会各会員。