

# 太陽電池による微生物制御

浅田 祥司・栞原みのり・吉本 隆光\*

## はじめに

現在の私たちの豊かで、快適な生活は石油、石炭、天然ガスといった化石燃料によって支えられている。しかも、人口増加、経済発展による生活の高度化はエネルギーの大量消費を促進し、化石燃料への依存は一層強まるばかりである。

こうした傾向は、限りある化石燃料の枯渇という深刻な不安を将来にもたらすだけでなく、現在既に私たちの日常生活にも大きな影響が出始めている。エネルギー獲得のために石油や石炭を燃やせば燃やすほど、発生する二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) などによる地球温暖化が進むようになる。さらに、亜硫酸ガスなどの硫黄酸化物 (SO<sub>x</sub>) や窒素酸化物 (NO<sub>x</sub>) などによる酸性雨は森林を枯死させ、湖沼の魚を死滅させ、生態系の破壊を一層強めていくばかりである。

さまざまな問題を抱えた化石燃料と異なり、エネルギー源としての太陽電池は実に優れた長所をもっている。

1) 太陽電池自体のエネルギーの源は太陽光であり、その寿命は半永久的、そのエネルギー量はまさに無尽蔵である

2) 太陽電池は光を直接電気に変換するため、化石燃料のように環境汚染物質を排出せず、極めてクリーンなエネルギー源である

3) 太陽電池の変換効率は発電規模に関係なくほぼ一定である。そのため通常の火力、水力、原子力による発電のように大規模集中方式は不要であり、

\*大阪市立此花工業高校

立地問題、建設時期などに左右されない

4) 太陽電池は、エネルギー消費の場所で発電するため、送電コストがからず、送電ロスも生じない

5) 太陽電池は、化石燃料のように戦争や為替などの要因でそのコストが必要以上に乱高下しない

こうした長所が広範囲に認められている一方、その短所としては入射エネルギー不足で大電力には大面積が必要、太陽電池の出力は気象条件によって変動、太陽電池は化学電池と異なり蓄電機能がない、太陽電池の高コスト(現時点では、化石燃料による発電に比べ、1ワット当たり約10倍の電力料金となる)といった点が指摘されている<sup>1,2)</sup>。

言うまでもなく、太陽電池普及の最大の課題はそのコスト低減であり、その鍵は太陽電池の変換効率を如何にして理論効率にまで近づけるか、太陽電池の用途を開発し需要を如何にして増やすかにかかっている。

本研究は、太陽電池のもつ優れた特性を生かしつつ、太陽電池の電気分解への利用という新しい分野の可能性を探ろうとしたものである。電気分解自体の用途は広く、従来からさまざまな提案が報告されてきたが、何よりもその高いランニングコストが大きなネックとなっていた。もし、電源として太陽電池を利用できるならこのネックは当然解消され、電気分解は太陽電池にとって極めて魅力的な分野になるのではないだろうか。

具体的には電気分解を利用した微生物制御について検討することにした。これを取り上げた理由としては、

i. 海や河川の汚染が深刻になるにつれ、新しい水質浄化手段の必要性が増大していること

ii. 浄化の対象となる海水や汚水には、電気分解に不可欠な塩分が必要量含まれていること

iii. 電気分解で発生する塩素の殺菌効果には持続性があり、太陽電池を組み込んだ全体のシステムの中に蓄電機能を必要としないこと

iv. 塩素による微生物制御には既に相当長い歴史があり、基礎および応用

の両面にわたる多くの成果、実績を生かすことができること  
といった点が挙げられる。

一方、微生物制御に電気エネルギーを直接あるいは間接に利用した従来の研究報告では、電源、電解装置、安全性、殺菌対象などの理由から、多量の塩素発生を伴わない小さな電流量で、供試菌には感受性の高い大腸菌を用いた例がほとんどである<sup>3~6)</sup>。

これに対し、今回は無限でクリーンな太陽エネルギーを電気変換する太陽電池の特性について予め検討した結果、太陽電池は通常のバッテリーなどに比べ、さまざまな条件下（電流値、発生塩素量、供試菌などを含め）でも安全にかつ容易に安定した電気分解ができる事実を見出し、これを利用した微生物制御の可能性について報告する。

## 実験方法

### (i) 電気分解

電気分解の実験は主として電極には炭素棒、電解液には食塩水（1～4%）、電気分解の電源には単結晶形の大型太陽電池（27 V × 2 A）を使用し、電気分解時の電流および電圧測定用には電流計を直列に、電圧計を並列に接続し、電流制御用には可変抵抗を並列に接続して行なった（図1）。

### (ii) 殺菌効果

実験の便宜上、図1に示した電解槽は上部が開放されているため、実験中だけでなく実験前にも雑菌汚染の可能性が考えられる。しかし、太陽電池による電気分解で発生する塩素は雑菌汚染を防ぐのに十分な濃度であり、塩素抵抗性の極めて強い細菌胞子を用いればこの問題は解消できることになる。本実験では、電気分解による殺菌効果をみるための供試菌として、*Bacillus subtilis* 168 の胞子懸濁液を用いた。

その胞子懸濁液は、液体ブイヨン培地（Difco）中で7日間振盪培養後、加

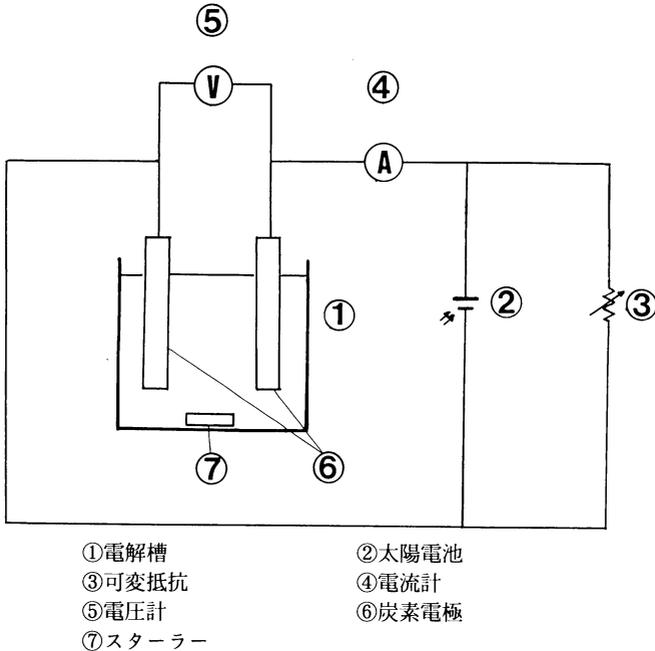


図1. 回路図

熱処理 (90°C, 10 分間) により栄養細胞を死滅させ、無菌水で3回洗浄することにより調製した。

一方、電気分解による殺菌効果の判定のために、孢子懸濁液を電解槽中で所定濃度にした後、通電を開始し、経時的に pH, 温度を測定すると同時に試料を採取し、残存生菌数を常法により標準寒天平板上でコロニーカウントした。

### (iii) 残留塩素

電気分解により生じた電解液中の残留塩素濃度は、オルト・トリジン法<sup>7)</sup>による残留塩素測定器 (柴田科学器械) を用い、経時的に測定した。

結合残留塩素濃度を求める場合、遊離残留塩素濃度を測定した状態のまま、さらに5分間静置し、再び色比較を行なう。この時読み取った値から、

前に測定した遊離残留塩素の値を引いた値を結合残留塩素濃度とした。

## 結果および考察

### (i) 太陽電池の電気特性

まず、太陽電池の電流と電圧の関係を知るため、負荷（可変抵抗）を接続し、抵抗値を徐々に変えながら電流と電圧を測定した。図2の結果（実線）は、太陽電池に特有の出力特性、即ちある電圧まではほぼ一定の電流が流れる傾向を示している。

次に、太陽電池以外の代表的な電池として乾電池、鉛蓄電池を取り上げ、

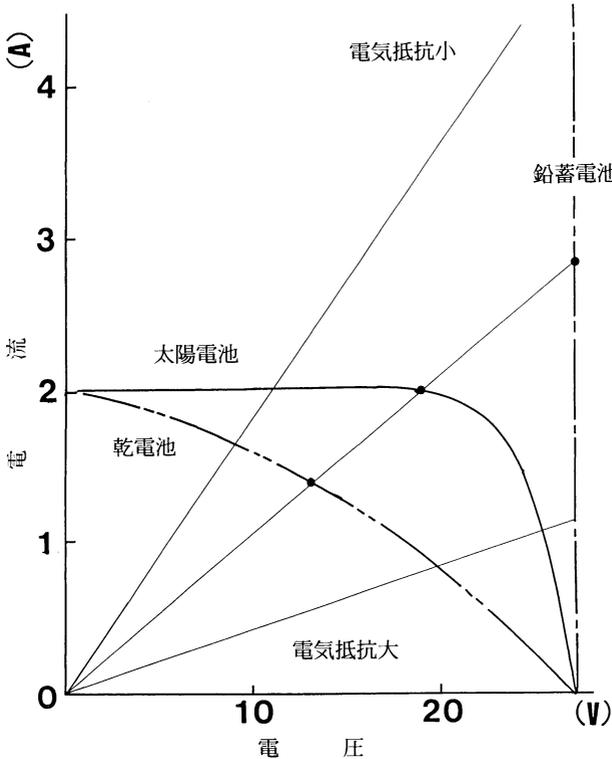


図2. 太陽電池の出力特性

同様に外部可変抵抗を変えながら電圧および電流の変化を測定した(図2)。乾電池の場合、電流が流れるとともに電圧が直線的に降下していく。これは、乾電池内に一定の内部抵抗が存在し、電流が流れるとともに電圧降下も大きくなるためである。ところが、鉛蓄電池の場合、ほとんど電圧降下はなく、急激な電流変化を生じ、短絡時の電流は測定不可能である。したがって、鉛蓄電池では内部抵抗が存在しないと考えてよい。

以上のことから、太陽電池では仮に電極が汚れたり、あるいは損傷を受けて抵抗が増加するような事態になったとしても、一定の電流が流れる、ただし電圧は変化することがわかる。したがって、常に安定した状態で一定電流が要求される電気分解の場合、太陽電池は他の乾電池や鉛蓄電池に比べ極め

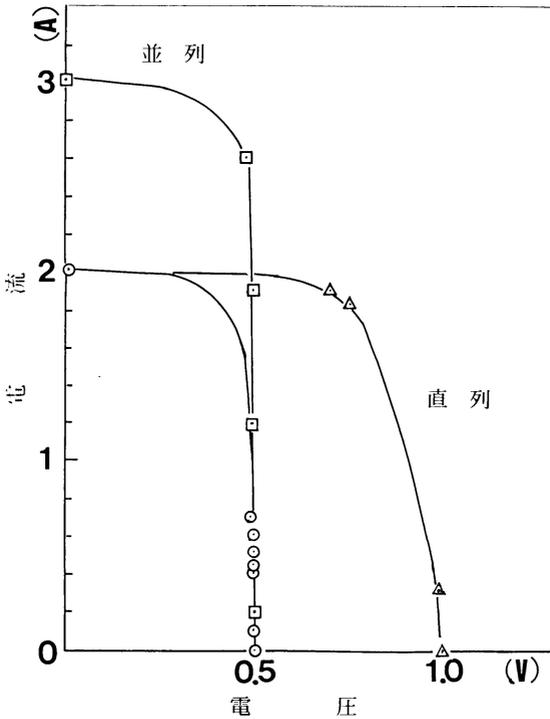


図3. 直列接続および並列接続

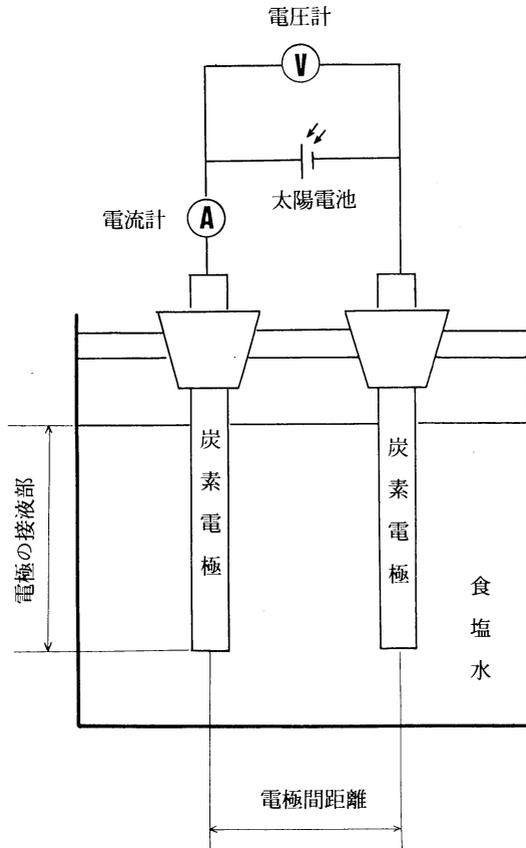


図4. 電 解 槽

て優れた電源と言えよう。

さらに、複数の太陽電池を直列あるいは並列に接続した場合についても同様の検討を加えた。図3に示した結果から、高い電圧が必要なら直列接続で、大量の電流が必要なら並列接続で対処することができる。なお、並列接続の場合、太陽電池の表面が完全に同一面とならなければ、各電池の照光割合が異なってしまい、起電力に違いが生じる。その結果、電池間に電圧差ができ、電池間に電流が流れるようになり、必要とする電流量が得られないことにな

る。

いずれによせ、太陽電池は接続方法を変えることで、自由自在に必要な容量の電圧、電流を取り出せることが明らかとなった。

### (ii) 太陽電池による電気分解への影響因子

太陽電池による電気分解に対し、さまざまな因子が直接、間接を問わず影

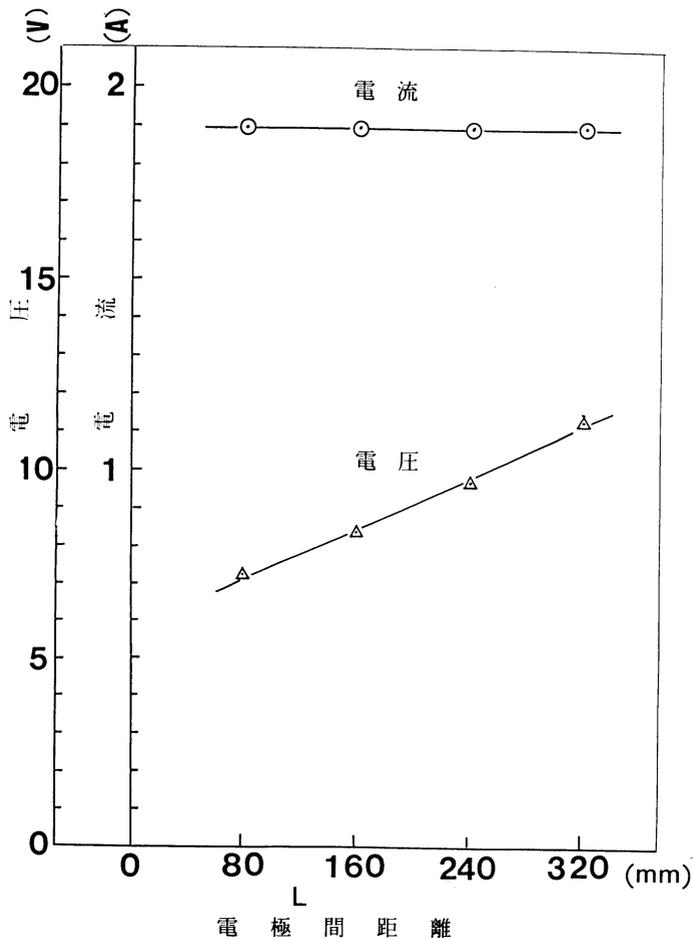


図5. 電極間距離の影響

響してくることは当然予想される。ここでは図1に示した電解槽内に限って検討することにした。図4には、この実験目的に沿って電解槽内をさらに詳しく示している。

まず、炭素電極間の距離を変えた場合、電圧および電流にどのような影響がみられるかについて検討した。その結果が図5である。実験した電極間距離（0～320 mm）の範囲内では、電流値は電極間距離に関係なく一定である。しかし、電圧の方は電極間距離が長くなるにつれ、ほぼ直線的に比例し

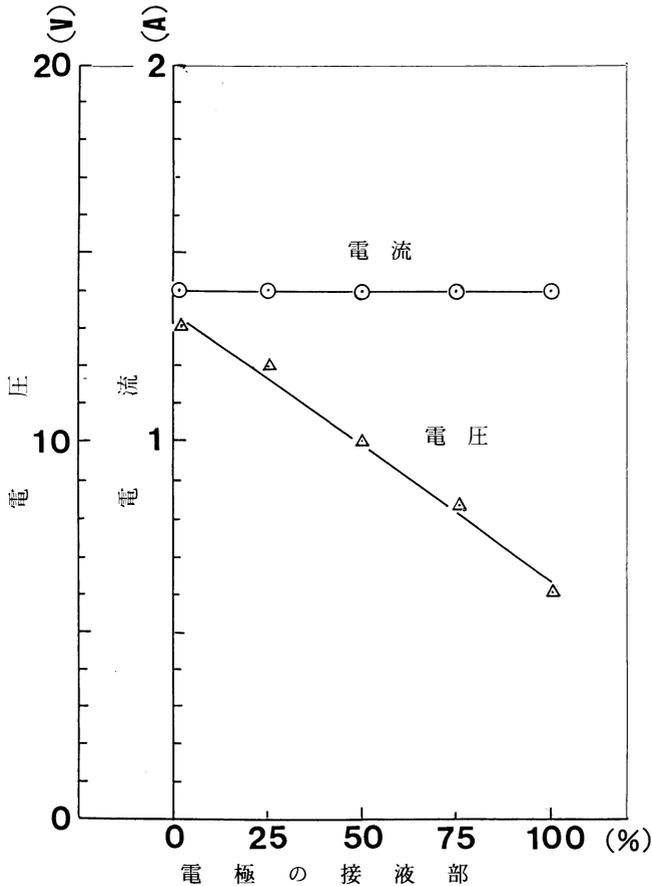


図6. 電極の接液面積の影響

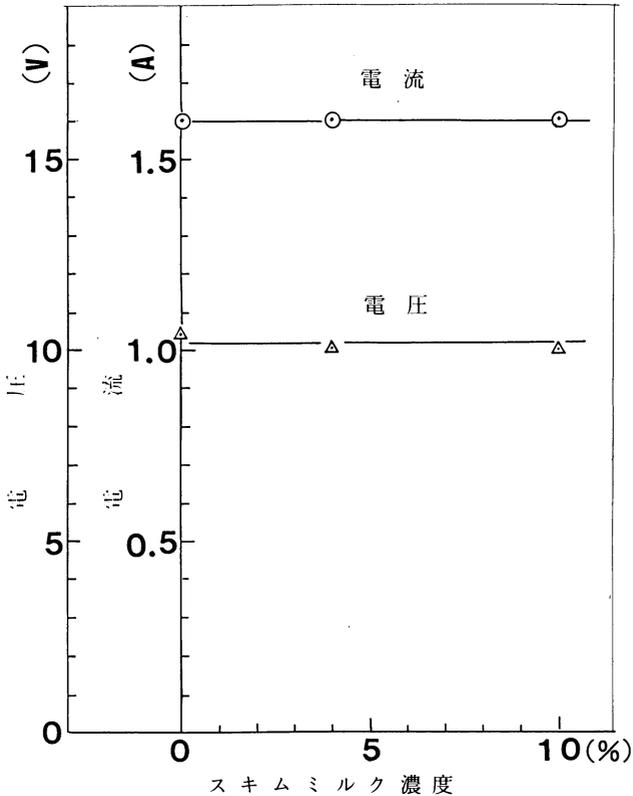


図7. スキムミルク濃度の影響

て上昇していく。これに対し、同様の実験を鉛蓄電池について行なったところ、太陽電池とは逆に電圧が一定で、電極間距離とともに電流値が下っていく結果となった。さらに、オームの法則から抵抗値を求めると、両電池とも電極間距離が長くなるにつれ抵抗値も比例して上っていく傾向が認められた。

次に、炭素電極棒が電解溶液（4%食塩水を使用）に接する面積の大小が、電圧および電流にどのような影響をもたらすかについて検討した。この場合、電極間距離は一定に保ち、図4に示した電極の接液部の長さを変えることで、接液面積の大小に対応できるようにした。図6がその結果である。太

陽電池の場合、接液面積に関係なく電流値は一定であるのに対し、電圧の方は接液面積が小さくなり外部抵抗として抵抗値が増えるのに比例して増加していく傾向を示している。これに対し、鉛蓄電池の場合、電圧の方が一定で電流値は接液面積に比例して上昇した。ただし、接液面積が大きいほど抵抗は小さい点では太陽電池と同じであった。

電気分解の対象となる溶液は単にミネラルやイオンだけでなく、さまざまな有機物を程度の差はあれ含んでいるのが常である。そこでスキムミルクを例に、有機物の影響についても検討を行なった。図7にその結果を示した。蛋白質換算で牛乳とほぼ同レベルの10%程度までは、電圧および電流はほぼ一定であり電気分解への影響は見出せなかった。また、スキムミルク濃度をさらに上げたり、通電時間を長くして影響の有無を確認しようとしたが、この条件では蛋白変性が著しく確認できなかった。スキムミルク以外の有機物として、澱粉などの影響については現在検討中である。

電解液として水道水を使った場合、電流は測定不能、即ち全く流れず、塩分の存在は不可欠である。そこで次に塩分濃度を変えて電気分解で流れる電流を測定し、濃度の影響について検討した。図8がその結果である。塩分濃度が2%以上であれば、流れる電流は一定で変わらないことを示している。その結果、何らかの要因で濃度変化が多少生じても電気分解には大きな影響をおよぼさないと考えられる。以下の実験では特に断わらない限り、海水(2~4%)を想定して4%濃度に電解液を調製して使用することにした。

以上の結果から、太陽電池は鉛蓄電池などに比べ

(1) 特有の出力特性のため、電気分解時の電流は安定した状態で一定に流れ、電源として優れている

(2) 陽極と陰極の距離、電極と電解液の接する面積、あるいは電解液中の有機物濃度が変化して抵抗が増えたとしても、電流は一定に保たれるという大きな利点があり、電解液も海水程度なら塩濃度の変動も問題にならない

このような事実は、太陽電池がさまざまな状況、条件下でも安定した電源として電気分解に使えるというだけでなく、従来ランニングコスト(電気代)

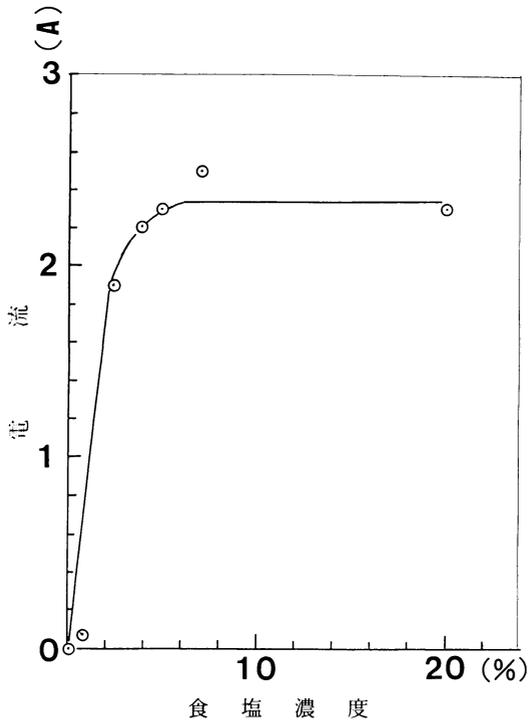


図8. 食塩濃度の影響

がネックとなっていた電気分解を広範囲の分野に適用できる可能性を示している。さらに、副生物の水素の燃料電池への利用、蓄電機能を組み込んだシステム化といったことまで考慮すれば一層その可能性が強まるのではないだろうか。

その一つとして、太陽電池による電気分解を微生物制御に使えるのではないかと考え、以下検討を行なった。

### (iii) 殺菌効果

4%食塩水の入った電解槽中で細菌胞子が約 $10^4$  / mlになるように調整後、通電を開始し、経時的にサンプリングを行なって生存率と残留塩素濃度を求めた。

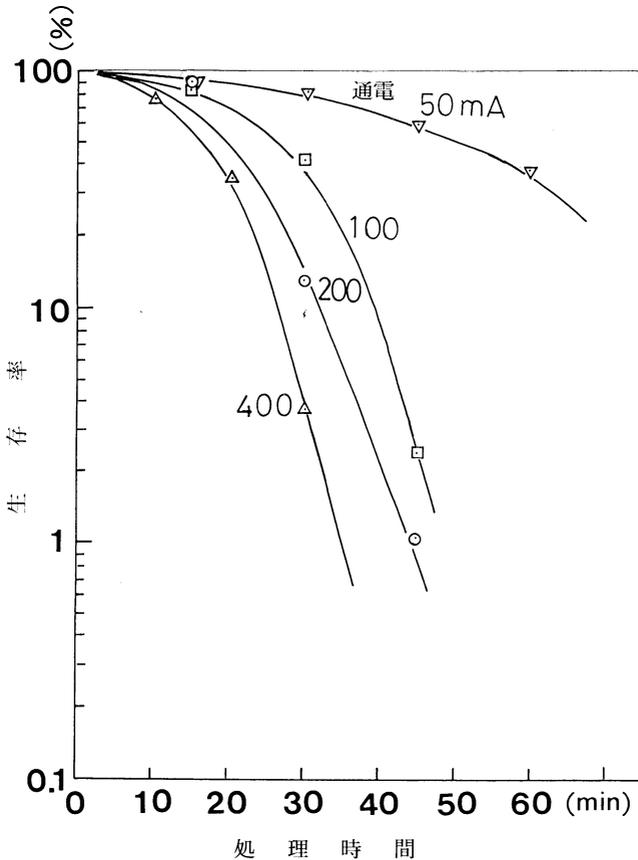


図9. 通電処理時間と生存率の関係

本実験で使用した太陽電池では天気の悪い日でも 200 mA 流れ、孢子死滅に通常必要とされる数十 ppm 以上の塩素濃度も容易に確保できた。反対に、天気の良い日には 2 A 流れるので、可変抵抗により必要電流値まで調整した。電解槽中の温度は約 20℃ で、実験中ほとんど一定であった。pH は通電により上昇傾向を示し、その程度は電流値と通電時間に依存した。通電 1 時間で言えば、50 mA の時 pH は 4.5 から 6.2 まで、100 mA の時 pH は 4.5 から 6.9 まで、200 mA の時 pH は 4.5 から 7.6 まで、400 mA の時 pH は 4.5 から

ら8.0まで上昇した。また、残留塩素測定は次亜塩素酸などの遊離残留塩素だけでなく、クロラミンのような結合残留塩素についても行なったが本実験では全く検出されなかった。

図9は、50 mA から 400 mA の電流量で、通電処理時間とともに胞子の生存率が各々どのように変化したか、その結果を表わしている。また、図10はその時の残留塩素濃度の変化を示している。

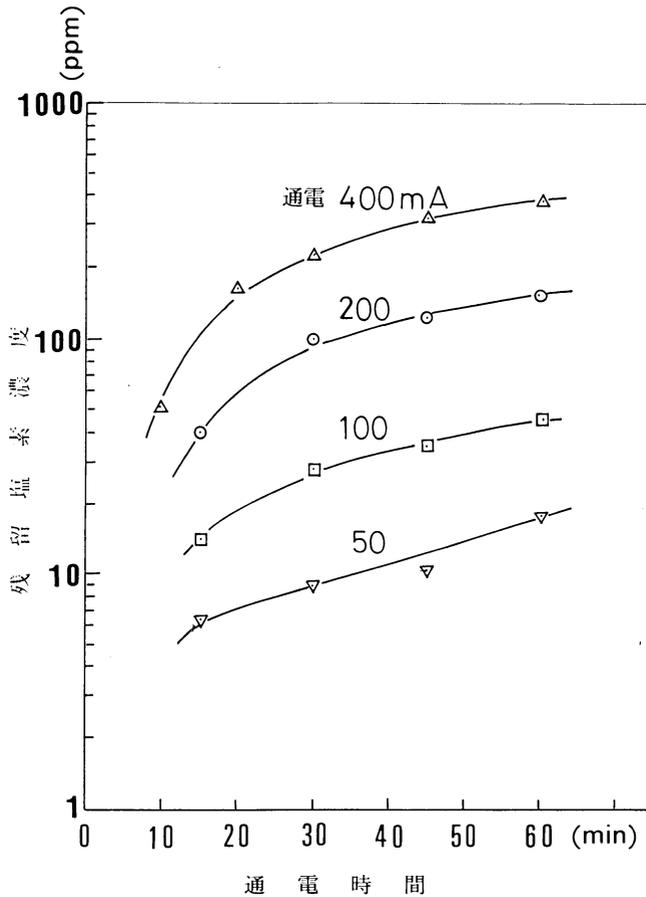


図10. 通电時間と残留塩素濃度の関係

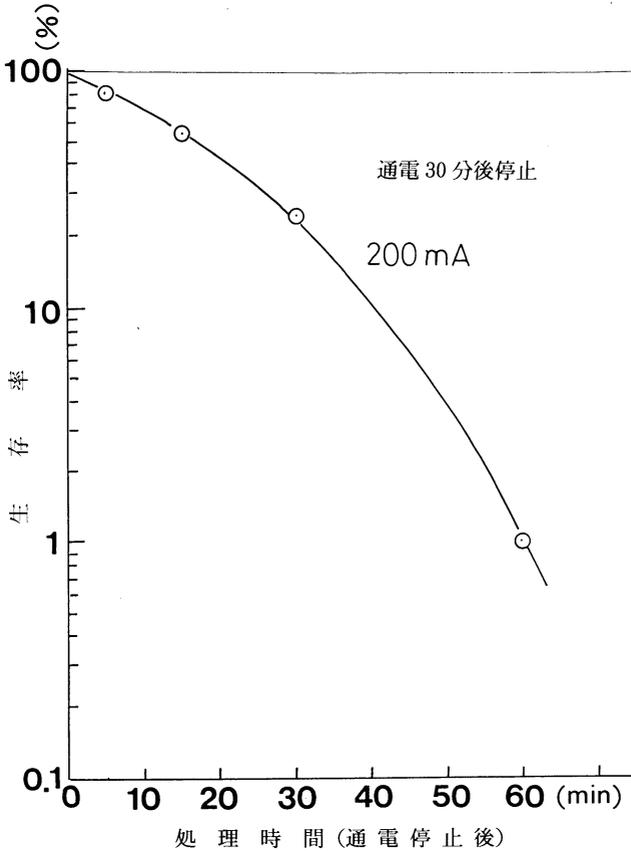


図11. 通電停止後の処理時間と生存率の関係

50 mA の場合、この通電時間では残留塩素濃度が 10 ~ 20 ppm までという低さのためか、胞子の死滅はゆるやかに少し進行するだけである。100 mA 以上になると、数十 ppm から数百 ppm の残留塩素濃度となり、電流値に依存しつつはほぼ対数的に生存率が低下していくようになる。図 10 から、残留塩素は電流値と通電時間、即ち電気量に依存してその濃度が上昇していき、高濃度に達すれば液外へ発生塩素が出ていく傾向が認められる。

図 9 および図 10 からは、胞子の死滅には電気分解によって発生した遊離残留塩素 ( $\text{HOCl}$ ,  $\text{OCl}^-$  など) が大きな役割をはたしていることが予想され

る。そこで、この予想を確かめるために以下の実験を行なった。

200 mA で 30 分間通電した後、電源を切り、電解槽中に孢子懸濁液を約  $10^4$  / ml になるように投入した。室温 (約 20°C) にこの電解槽を放置し、経時的に生存率を調べ、同時に残留塩素も測定した。この結果が図 11 である。

通電終了直後、約 100 ppm だった残留塩素濃度は放置時間とともに徐々に下っていく。そして、通電停止後の生存率低下は通電中の場合に比べややゆるやかになるが、ほぼ同様に進行し、著しい違いは見出せなかった。この結果は、通電に伴う直接的要因によって孢子は死滅するのではなく、通電によって発生する極めて寿命の長い生成物、即ちラジカルでなく HOCl,  $\text{OCI}^-$  などによって孢子は死滅することを強く示唆している。

電気分解による殺菌機構としては、直接作用と間接作用によるものに大別できる。直接作用としては電極表面で細胞が酸化または還元される場合が考えられるが、本実験では細胞が電極に接触する頻度は少なく、この作用の殺菌への寄与はあったとしても極めて少ないと思われる。これに対し、間接作用は電解液中のイオン、溶媒、溶存気体などの酸化還元反応を経て生まれるもので、フリーラジカル、次亜塩素酸 (HOCl)、次亜塩素酸イオン ( $\text{OCI}^-$ ) などが主役となる。

*Escherichia coli* を供試菌に、2 mA までの極めて低い電流を生理食塩水中に通して電気分解を行ない、その殺菌効果について検討した報告<sup>3~6)</sup>がある。これによると、殺菌効果は電流値とは無関係に、通電した総電気量 (電流値×通電時間) によって一義的に決まること、殺菌効果は通電中に限られ、通電停止後はみられないこと、溶存酸素濃度や食塩濃度が上るにつれ殺菌効果が高まることなどが観察されている。これらの結果は本実験の場合とは相当異なっている。

図 12 には、本実験で得た生存率低下と電気量の関係を示した。この結果から、孢子の死滅は電気量に依存しないことは明らかである。しかも、この場合 400 mA よりも 50 あるいは 100 mA といった低電流の方が電気的には殺菌効果が高いことを示している。この理由として、

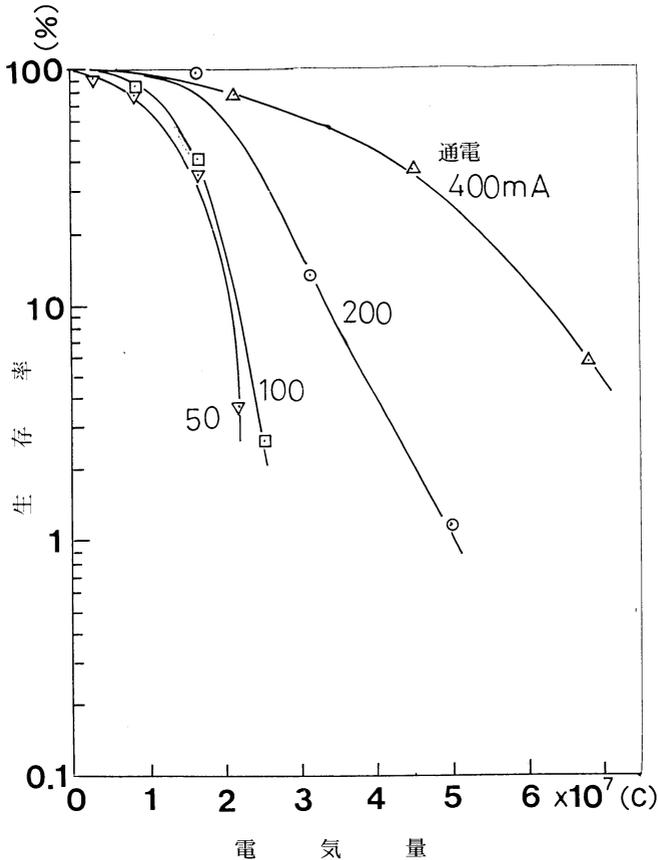


図12. 電気量と生存率の関係

1) 高電流では高濃度の塩素が溶解度以上に発生して液外へ出ていくため、電気的な殺菌効率が低くなる

2) 高電流の方が pH 上昇が大きく、殺菌効果が最も高いとされる未解離の HOCl が減り、代りに比較的殺菌効果の低い OCl<sup>-</sup> が増えるため

3) 胞子が HOCl に接触してすぐ死滅に至るのではなく、多くの段階を経て死滅に至るため

といったことが考えられる。

電気分解による殺菌効果について検討した両者の実験結果は、ともに間接作用に基くと考えられるのに、何故このような違いが生まれたのであろうか。

*E. coli* の場合<sup>6)</sup>、塩素イオンの陽極酸化 ( $\text{Cl}^- \rightarrow \cdot\text{Cl} + \text{e}^-$ ) によってできる塩素ラジカル ( $\cdot\text{Cl}$ )、およびこれから誘導される短寿命の各種活性種が細胞の致死損傷の主役である。その機構としては、細胞膜破壊、溶菌、DNA 損傷、致死といった一連のプロセスが考えられる。これに対し、本実験の孢子の場合、電気分解による安定な最終生成物とも言える次亜塩素酸 ( $\text{HOCl}$ )、次亜塩素酸イオン ( $\text{OCl}^-$ ) が致死損傷の主役であり、主に酵素蛋白や核蛋白の SH 基の破壊によるものと推定される<sup>8)</sup>。

このように、致死損傷の主役とその機構が *E. coli* の実験と本実験とは異なると考えた方が全体的にうまく結果を説明できよう。

将来的には、*E. coli* の実験のような低電流の電気分解はミネラルウォーターなどの飲料水の分野で有望と思われる。これに対し、本実験のような高電流の電気分解は海に近い下水処理場、魚や貝の養殖場、海水の膜による淡水化プロセスの前工程、温水器の藻処理などの分野で大いに期待されるのではないだろうか。何故なら、

- 1) 下水や海水には孢子のように抵抗性の強い微生物が存在する
- 2) 下水や海水には有機物が多く含まれる結果、塩素消費量、塩素要求量が大きくなり、低コストの大量の塩素が要求される
- 3) 下水や海水は天候によって水量変化、有機物濃度の変動、細菌数の変動が大きく、常に電流量、発生塩素量を変えていかねばならないが、本実験での場合、このフィードバック制御が容易で、抵抗を少し変えるだけでよい
- 4) 塩素には殺菌効果の持続性があり、バッチ運転でよい。したがって、天候の悪い時、夜間など状況に応じて蓄電機能、補助塩素タンクなどをシステム化して対処している
- 5) 感電の危険性がなく、極めて安全であるだけでなく、電気代などのランニングコストが不要

といったことがその理由として指摘できるからである。

今後、太陽電池の新しい用途が開発され、新規の需要が増えるようになるのと同時に、変換効率のさらに優れた太陽電池が登場するようになれば、それは地球環境の問題解決に大きく貢献することと期待される。

## 謝 辞

本研究には、大阪市立此花工業高校の上市達生、上野准治、井上利彦、雲北順一の諸氏に多大の御協力をお願いしました。ここに深く彼らの努力と情熱に感謝の意を記します。

## 参考文献

- 1) 桑野幸徳: 太陽電池を使いこなす, 講談社: 37, (1992).
- 2) 桑野, 武岡 (編著): 太陽電池活用ガイドブック, パワー社: 4, (1992).
- 3) 西本, 八田, 西田, 傳, 米井, 鍵谷: 日本化学会誌, 823 (1988).
- 4) K. Shimada and K. Shimahara: Agric. Biol. Chem., 45, 1589 (1981).
- 5) A. Pareilleux and N. Sicard: Appl. Microbiol., 19, 421 (1970).
- 6) 高野, 横山 (監修): 新殺菌工学実用ハンドブック, サイエンスフォーラム社: 449, (1991).
- 7) 厚生省生活衛生局水道環境部 (監修): 上水試験方法, 日本水道協会: 309, (1985).
- 8) 芝崎 勲: 新食品殺菌工学, 光琳: 240, (1983).