

生物への新たなストレス ——電場の影響——

井上 雅好*

M. Inoue: Bioeffects of electric fields, as a new hazard

はじめに

種子内に存在する数個の始原細胞が分裂をくり返し、栄養器官や生殖器官を分化して、最終的に次代の種子を結実して終る植物の一生は、自分と同一な遺伝子をできるだけ多く残そうとする自己保存的な特性を持つ過程であると言える。しかし、この特性は生育する環境から受けるさまざまなストレスによって乱されたり、時には個体そのものが死に至ることもある。そのような事態に対して植物がどのように対処するのか、遺伝的な障害として誘起された変異がどのような消長をたどるのか、等々、X線・γ線などの電離放射線、高温・低温などの温度ショック、極端な乾燥や湿潤などの水分ショックなど、各種ストレスについての研究が進められてきた。既に各種の防御機構や損傷の修復機構も明らかにされている。しかしながら、最近になって、生物に対する新たなストレスが注目されるようになってきた。非電離放射線の生物への影響である(図1)。癌の温熱

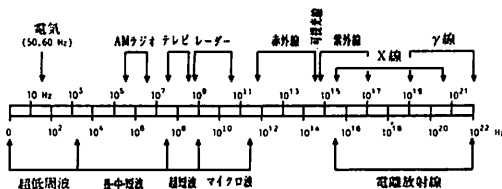


図1. 電磁波のスペクトラム

治療によく利用される 10^9 Hz を中心とする電磁波や超低周波の電磁波によって誘起される電磁場の生物作用である。中でも、電磁場の生物作用については不明な点が多く、超低周波の電磁波を用いた通信システム・超高電圧での送電システム・各種の核磁気共鳴装置などの開発が進むにつれて、その影響が一段と大きくなることが予想されることがや電気特性を利用して生物反応が維持されていることなどの観点から、その作用機作の解明や影響評価の策定が急がれている。

ここでは、植物根細胞で得られた研究結果をもとに、電場の生物作用について概観したい。

電磁場の生物への影響

強力な電磁場の発生源は種々様々であるが、その最も身近なものの一つに送電線がある。送電中の電力損失の軽減化を計るために超高電圧での送電システムが考案・試行されているが、送電電圧が高くなるに伴って、より高く且つ大規模な送電線やそれを支える鉄塔が必要になる。高電圧送電線の敷設によって生じる問題点を表1に示した。それらの一部は

表1. 「高電圧送電」によって生じる問題

- I. 大規模な送電線の敷設およびその管理に伴う問題
 - i 送電線および周辺道路の敷設・管理による環境破壊(樹木の伐採など)
 - ii 敷設工事による「土の踏み固め」や土壌変化
 - iii 農作業上の障害物としての鉄塔および送電線
 - iv 美観上の問題
- II. 高電圧での感電による障害
- III. コロナ放電の問題
 - i ラジオおよびテレビの受信障害
 - ii 雑音
 - iii オゾンおよび窒素酸化物の生成
- IV. 送電線周辺に誘起される電磁場の影響
 - i 放電によるガス・ガソリン等の発火
 - ii 誘導電流による放電ショック
 - iii 心臓ペースメーカーの攪乱
 - iv 生物学的効果

適切な工法の実施あるいは管理規準の設定によって解決されつつあるが、送電電圧の増加につれて強くなる周辺電磁場の生物学的効果は環境保全上の問題として注目されている。因みに、地上20, 50および60mに架設された230, 500および1100KVの高圧送電線の中心から15m離れた地点における地上1m高さでの電場の強さは、それぞれ、0.4, 1.5および9KV/m程度となる。このような電場の強さは、自然状態での値(晴天時では120~150V/m, 雷雨時

* 大阪府立放射線中央研究所
〒593 堺市新家町704

には10KV/m になることもある)に比べて非常に高く、その生物作用が懸念される所以となっている。一方、高圧送電線周辺に誘起される磁場の強さは、1100KV 送電の場合でも最高0.3G程度であるが、地磁気の強さが0.5G(max.)であることから考えて、各種動物の「渡り」や「帰巢」におよぼす影響が危惧されている。

電磁場の生物学的効果に関する社会的関心が高まるにつれて、送電線保守作業員・変電所作業員・送電線周辺で飼育栽培されている動植物を対象にした各種の野外調査、さらにはマウス・ラット・犬・ウサギ・植物を用いての実験室レベルでの研究が進められている。しかしながら、電場照射では通電による温度の上昇が著しく、培養液(培地)の温度制御が困難であることから、電離放射線あるいは環境変異源の生物学的効果の検定によく利用される微生物および培養細胞を用いての研究はあまり進んでいない。

植物根細胞への電場照射

植物根細胞への60Hz 電場照射は培養液(電気伝導度、0.07~0.09S/m)中で行う。培養液中では空气中に比べて 10^7 倍に近い電場強度での照射ができることもあって(例えば、培養液中での0.003V/m は空气中での10000V/m に相当する)、広範囲にわたる電場条件での照射実験が可能となる。また、培養液の温度調節を行うことにより通電による温度上昇も容易に制御できる。図2に照射装置の概要を示

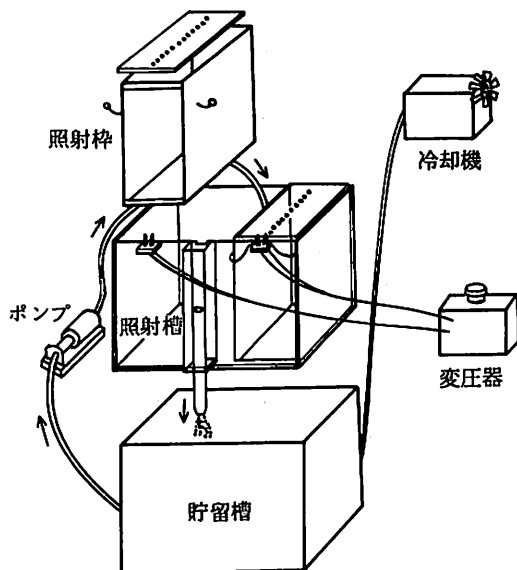


図2. 60Hz 電場照射装置の概要

した。この装置は照射槽と貯留槽とから成っており、無機塩培養液は図中矢印の順に両者の間を循環し、貯留槽にセットされた冷却装置によって培養液の温度は一定に保たれる。照射槽には変圧器に結線されたそれぞれ一対の電極板をもつ二つの照射棒がはめ込まれ、一方の照射棒の電極はアースされている。植物根をこれら二組の電極板の間に定置した後通電することにより、照射区および対照区(非照射区)の材料を同一条件で同時に培養することができる。なお、電極板はステンレススチールで、その他の部分はアクリル樹脂でつくられている。

植物根細胞の電場感受性

電場の生物学的効果は、電流密度(mA/cm^2)には関係なく、電場強度(V/m)に依存することが明らかにされている(Miller et al. 1979, 1980; Robertson et al. 1981)。

電場照射による生育抑制効果の一例として、60Hz 電場を照射したソラマメ幼根の伸長抑制パターンを図3に示した。200V/m ($1.4\text{ mA}/\text{cm}^2$), 290V/m

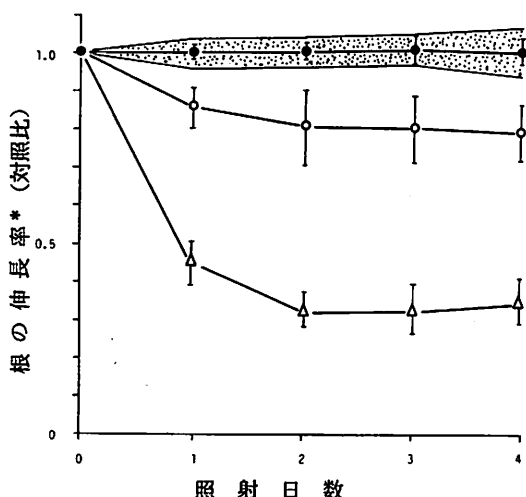


図3. 60Hz 電場照射によるソラマメ幼根の伸長抑制

* 照射区の対照区に対する1日当り伸長量の比。

□, 対照区; ●, 200V/m ($1.4\text{ mA}/\text{cm}^2$);
○, 290V/m ($2.0\text{ mA}/\text{cm}^2$); △, 360V/m
($2.5\text{ mA}/\text{cm}^2$)

($2.0\text{ mA}/\text{cm}^2$) および 360V/m ($2.5\text{ mA}/\text{cm}^2$) の連続照射(4日間)によって根の伸長は電場強度に比例して抑制され、抑制率は、290V/m では約20%, 360V/m では約70%と、照射2日目以降ほぼ一定であった。また、290および360V/m の照射によ

り根の表皮が褐変する。Brulfert et al. (1985) もサヤエンドウ幼根において同様な結果を得ており、さらに、組織観察の結果から、電場照射によって細胞の伸長が著しく抑制されることも明らかにしている。

細胞分裂や染色体あるいは染色分体に対する 60 Hz 電場の影響については不明な点が多い。顕著な生育抑制効果のある電場強度では G_2 ブロックが起り、細胞分裂活性が低下することが報告されている (Robertson et al. 1981; Inoue et al. 1985) が、[線量-効果] 関係は現在までのところ明らかになっていない。

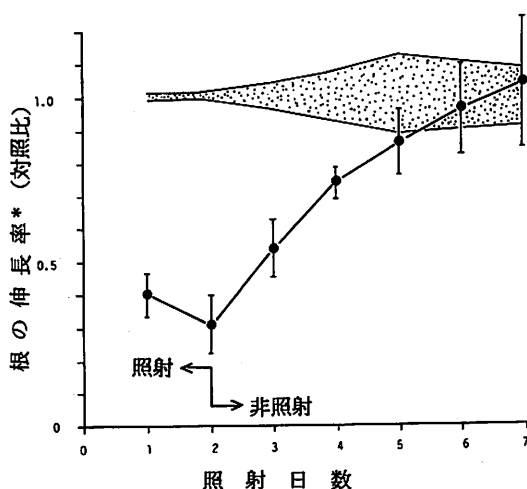


図 4. ソラマメ幼根の伸長量でみた 60 Hz 電場照射障害の回復

* 照射区の対照区に対する 1 日当り伸長量の比。
○, 非照射区; ●, 照射区

60 Hz 電場 ($360 \text{ V/m} \cdot 2.5 \text{ mA/cm}^2$) 照射後の根の伸長量の変化を図 4 に示した。照射 2 日目には対照区の約 30% まで低下していた伸長量は照射停止直後から増加して、4 日目には対照区と同程度の伸長量となった。また、照射中に伸長した根の表皮は照射停止後も褐色のままであったのに対して、照射停止後に伸長した部分は対照区と同様な白色であった。これらは、照射停止後に伸長抑制からの回復が起こることを示すものであり、Robertson et al.

(1981) のサヤエンドウ幼根での調査結果と一致する。

電場照射中の培養液における生育阻害物質生成の有無について

植物根細胞への 60 Hz 電場照射で用いられる培養液には各種の無機塩が加えられているため、通電に

よって培養液中で電気分解物が生成されるかどうか、電気分解物による根の伸長抑制が起こるかどうかの検討が必要である。

Miller et al. (1983) はサヤエンドウ幼根の水平方向および垂直方向での 60 Hz 電場の照射を同一電場条件で行なった。電場照射による根の伸長抑制が電気分解物によって誘起されるものであれば、水平・垂直両方向で同様な抑制の程度となるはずであるが、実際には、照射方向に沿った細胞面積がより広い垂直方向での照射において水平方向の照射よりも大きな伸長抑制効果を得た。

Inoue et al. (1985) は「Flow-Through System」を用いて電気分解物の生成について検討した。「Flow-Through System」は、培養液の流れに沿って「上流対照区」(非照射区, U-C), 「照射区」および「下流対照区」(非照射区, D-C) をセットにした照射槽と、これとは別の「独立対照区」(非照射区, I-C) 用の照射槽とを一つの照射槽に入れて照射・培養を行なう方式である。培養液は、照射槽で I-C を通る流れと U-C → 照射区 → D-C を通る流れとに分かれて貫流し、貯留槽へ入った後攪拌・循環されて照射槽へ戻る。照射区において電気分解物が生成されれば、それは培養液の流れに乗って下流の D-C へ流れ込み、根の伸長に影響をおよぼすことになる。したがって、本装置では、I-C, U-C, D-C ならびに照射区における根の伸長量を比較することにより、照射 (通電) による生育阻害物質生成の有無を検討することができる。430 V/m (3.0 mA/cm^2) の電場を 2 日間連続照射した時の根の伸長量について ANOVA 分析を行なった結果、照射区と I-C, U-C あるいは D-C との間では非常に高い水準での有意差があるのに対して、I-C, U-C, D-C 相互の間では有意差は認められなかった。さらに、2 日間照射と同じ方法で行なった 4 日間照射においても 2 日間照射と同様な分析結果が得られ、照射区における伸長抑制率は 2 日間照射・4 日間照射ともに約 65% であった。

以上の結果から、60 Hz 電場照射によって誘起される根の伸長抑制は電場の直接作用によるものであって、電気分解物によるものではないことが結論できる。

各種の植物根細胞における電場感受性

電場感受性は植物の種類によって異なる。その一例を図 5 に示した。60 Hz 電場照射によって誘起される伸長抑制のパターンはソラマメ、エンドウともに類似した推移を示すが、伸長抑制に関する電場の

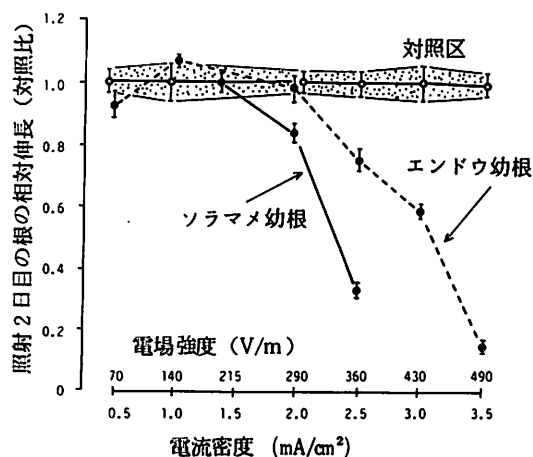


図5. 60 Hz 電場照射による根の伸長抑制

閾値は、ソラマメでは 230 V/m、エンドウでは 300 V/m となる。

電場感受性の違いをさらに検討するために、細胞直径の異なる12種類の植物根 (図6) に 360 V/m (2.5 mA/cm²) の電場照射を行った。供試材料中、

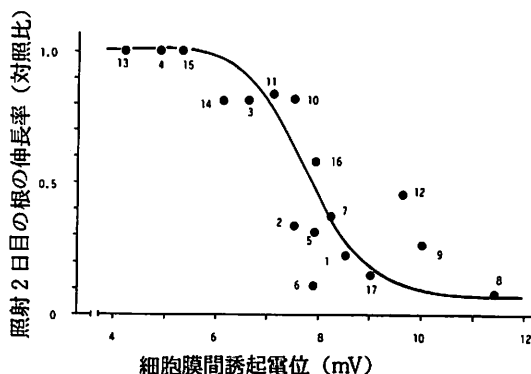


図6. 根の伸長率でみた 60 Hz 電場 (360 V/m・2.5 mA/cm²) の感受性と細胞膜間誘起電位との関係

1, カボチャ (平均細胞直径 23.7 μ m); 2, ソラマメ (20.9 μ m); 3, サヤエンドウ (18.3 μ m); 4, キュウリ (13.5 μ m); 5, アサガオ (22.0 μ m); 6, グラジオラス (21.9 μ m); 7, ヒヤシンス (22.7 μ m); 8, アマリリス (31.8 μ m); 9, タマネギ (27.9 μ m); 10, トウモロコシ (20.7 μ m); 11, オオムギ (19.7 μ m); 12, コムギ (26.7 μ m)。13および14はソラマメ, 15~17はサヤエンドウの異なる電場条件での照射実験から得た。

前形成層・篩部・根端分裂組織での細胞直径の平均値が最小のキュウリ (13.5 μ m) では伸長抑制効果が認められないのに対して、平均細胞直径が最大のアマリリス (31.8 μ m) では92%の抑制率となり、細胞直径と電場感受性との間で極めて有意な相関関係が認められた。大きい細胞を有する植物ほど電場感受性が高いと言える。

図6に細胞直径と電場強度から算出した細胞膜間誘起電位と電場感受性との関係を示した。照射材料ならびに照射条件の違いにも拘らず、両者の関係は一つの曲線で表わされ、植物根細胞における伸長抑制に関する細胞膜間誘起電位の閾値は約 6 mV、伸長停止電位は10~11 mVであることがわかる。

以上に述べてきたことから、60 Hz 電場照射によって誘起される根の伸長抑制は電場の直接作用によるものであり、電場感受性は照射細胞の直径に依存すると結論できる。

現在、電場の生物学的効果の作用因として、電場照射によって誘起される細胞膜間電位と細胞膜外表面での接線電位とが提唱されている。細胞膜間誘起電位は電場強度と細胞直径との二つの要因で決定されるのに対して、接線電位は電場強度のみによって決定される。したがって上述の諸結果は細胞膜間誘起電位が電場の生物学的効果の作用因であり、細胞膜電位の変化が電場の作用過程の起点であることを示唆するものである。すなわち、細胞膜電位の変化により細胞膜の変性あるいは細胞膜機能の変化が起こって、細胞の分裂あるいは伸長が抑制されるものと考えられる。しかしながら、約 5 mV といった細胞膜間誘起電位の狭い範囲で根の伸長抑制率が0%からほぼ100%と大きく変化することから、細胞膜誘起電位以外にも電場の生物学的効果の発現に関与する変更要因があるとも考えられる。

60 Hz 電場感受性と細胞膜間誘起電位との関係から同定した根の伸長抑制に関する細胞膜間誘起電位の閾値 (約 6 mV) および伸長停止電位 (10~11 mV) は、神経細胞等の特殊なものを除く体細胞に対する電場の生物学的効果を検討するための基本的な指標になるものと思われる。

なお、電場あるいは磁場の長期間照射の影響、特に遺伝的な影響については不明点が多く、早急な解明が望まれる。

おわりに

“便利で快適な人間社会”を指向する中で、人間の営みにより自然環境が大きな影響を受けている。

生態系の破壊、各種の化学物質や放射性物質の環境への放出、などに加えて、マイクロ波・超音波・超低周波などの非電離放射線も生物環境に影響することがわかってきた。人間にとっても、他の生物にとっても住みづらくなってきたとも考えられる。生物は、生命維持のために、環境から受ける損傷に対して各種の修復機構を有している。とは言え、生物の健全な成長に対するストレスの多いことやリスクが増加しつつあることに危惧を感じる。

参 考 文 献

- Brulfert, A., Miller, M. W., Robertson, D., Dooley, D. A. and Economou, P. 1985. Bioelectromagnetics, 6: 283 - 291.
- Hauf, R. 1982. In: Suess, M. (ed.) *Nonionizing radiation protection*. WHO. pp 175-197.
- Inoue, M., Miller, M. W., Carstensen, E. L. and Brayman, A. A. 1985. Radiat. Environ. Biophys., 24: 303 - 314.
- Inoue, M., Miller, M. W., Cox, C. and Carstensen, E. L. 1985. Bioelectromagnetics, 6: 293 - 303.
- Inoue, M., Miller, M. W., Cox, C. and Brayman, A. A. 1985. Environ. Exp. Bot., 25: 89 - 97.
- Lee, Jr. J. M. 1982. *Electrical and biological effects of transmission lines: A Review*. DOE, Bonneville Power Administration.
- Miller, M. W., Carstensen, E. L., Kaufman, G. E. and Robertson, D. 1979. In: Phillips, R. D. et al. (eds.) *Biological effects of extremely low frequency electromagnetic fields*. DOE Symposium Series 50 pp 109 - 116.
- Miller, M. W., Carstensen, E. L., Robertson, D. and Child, S. Z. 1980. Radiat. Environ. Biophys., 18: 280 - 300.
- Miller, M. W., Dooley, D. A., Cox, C. and Carstensen, E. L. 1983. Radiat. Environ. Biophys., 22: 293 - 302.
- Miller, M. W., Economou, P., Cox, C. and Robertson, D. 1982. Environ. Exp. Bot., 22: 271 - 275.
- Robertson, D., Miller, M. W. and Carstensen, E. L. 1981. Radiat. Environ. Biophys., 19: 227 - 233.
- Robertson, D., Miller, M. W., Cox, C. and Davis, H. T. 1981. Bioelectromagnetics, 2: 329 - 340.