

外96-41

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

生体電位計測による
植物の情報システムに関する研究

申請者

柳橋 康博
Yasuhiro Kushihashi

1996年 12月

植物は、環境に対して柔軟な適応が可能であるといわれている。動物における脳や神経系などに相当する情報器官の存在が確認されていない植物が、どのように環境情報を受容し、自分で発生、分化、成長などの形態形成にかかわる情報を創り出すのかという問題は、情報論的に多くの興味深い課題を含んでいる。このような植物における情報の構造や情報ネットワークのメカニズムを明らかにすれば、生物学的な成果にとどまらず、工学分野において、植物型情報機械として無中枢、自律分散型の制御システムの構造や設計原理などへの応用が期待できる。

しかしながら、植物における情報の受容、伝達、処理、形態形成までの情報構造や様式については不明な点が多く、仮説すら立てられないのが現状である。さらに、情報に関する組織や器官が分化していない植物について、いかなるスケールで要素分離が可能であるかが不明であり、計測部位、計測領域をどのように設定するかという計測方法自体が確立されていない。そのため、まず、計測手法から検討、開発してゆく必要がある。

以上のような背景から、本研究においては、植物においても情報システムが存在しているとの立場に立ち、その構造やメカニズムを解明するアプローチとして、非破壊、非侵襲な手段である生体電位計測に着目した。さらに、植物の細胞から器官レベルにいたる幾つかのスケールで生体電位計測を可能とする計測技術についてその手法の確立を目指すとともに、それらから得られた電気現象を基に、植物の生体情報システムに関する知見を得ることを目的とした。

本論文は、以下のように構成される。

第1章は、序論であり、植物を情報論的な観点から捉える必要性とその手段として電気的計測法に着目することを述べた。さらに、本研究に関連した電気的計測法の概要と問題点を挙げるとともに、植物を対象とした多点計測による電気的計測法の確立と植物の情報システムに関して調べることを研究目的として挙げた。

第2章においては、多点計測を考慮した計測法として、表面電位の誘導と計測電位に重畠する微弱な電位変化(AC成分)に着目し、AC成分とDC成分の同時計測および任意の深さにおける細胞内電位と表面電位を同時計測可能な計測システムを設計・開発した。本計測システムを適用することにより、表面電位と細胞内電位とのAC成分同士での比較を試みた結果から、表面電位におけるパルス状、ゆらぎ波形は細胞の集団的な振る舞いとして計測されていることを示した。また、無刺激の状態において、複数の葉についての生体電位AC成分において、それぞれの瞬時値には相互に弱い相関があることを明らかにした。さらに、自発的なパルス状波形がしばしば複数の葉で共通に発生する同期現象を見出した。これらの結果から、葉相互にインタラクションが存在し、それによりパルス発生周期に相互引き込みが起きていることを示した。

第3章においては、音に対する受容様式についての知見を得るために、専用の実験システムを構築することにより、植物生体電位の音刺激環境下における変化挙動について調べた。その結果、音圧レベル70[dB]以上の音・音楽刺激によって、静止状態の表面電位AC成分にパルス状の波形が誘発されたり、自発的な電位変化が攪乱されたりする葉が存在することが認められ、植物が音を感知する能力を有することを示した。さらに、可聴域の正弦波を音刺激として印加した場合、周波数の違いによる顕著な電位変化は認められていないが、リズミックな音により敏感に応答する傾向があり、一定時間間隔で拍子音を印加した場合には、1[s]から20[s]の範囲内の刺激周期において、誘発パルスが刺激音に引き込まれ、刺激周期に同期してゆく現象を発見した。すなわち、植物は内部相互のみならず、外部からの刺激に対しても引き込みを示すことを明らかにした。

第4章においては、葉の組織、組織集団レベルにおける計測を可能とするため、複雑な表面形状に合わせて受動的に変形可能な柔軟構造による多点電極を考案・開発した。また、高入力インピーダンスを実現するとともに、多点計測で問題となる葉と電極の接触状態を把握可能な前置増幅器を開発した。さらに、これらの電極、前置増幅器に対してのみならず、他の電極、前置増幅器を付加することで様々な計測対象、計測スケールに対応可能な汎用生体電位多チャンネル計測システムを開発した。本システムにより、±384[mV]の広入力電圧範囲において、振幅0.5~1[mV]の微弱なAC成分の計測を可能とし、AC成分、DC成分の同時計測を実現した。

本試作装置を適用して、カポックの葉表面における組織レベルでの多点同時計測を行った。計測チャンネル相互の相関を調べることにより、葉内部において数[mm]程度の範囲内で組織あるいは組織間で協調的なインタラクションが存在する可能性を見出した。

第5章においては、カルスの磁気刺激応答性について述べた。

脱分化した不定形細胞集団であり、組織性を持たないカルスについての応答性の有無や様式について検討するため、局所的な磁気刺激応答性について、時間的、位置的の両面から調べることを目的として、無菌維持が可能な培養カプセル内に刺激用電極と磁気刺激デバイスを一体化した専用の計測装置を開発した。本装置を適用することにより、磁気刺激に対してカルス全体が反応するのではなく、局所的に反応し、しかもその挙動は時間的、空間的に変化することを見出した。また、カルス細胞集団の局所領域に磁場を与えた場合、直接受けていない領域において生体電位が変化することを見出し、刺激情報の伝達が行われていることを示した。

第6章では、より細かな空間分解能での2次元計測の実現を目指し、カルスにおける磁気刺激応答性のみならず、形態形成に伴う電気現象について述べた。

カルスの表面、ならびに、水耕液中の根近傍における電位分布の計測を対象と

し、[mm]のオーダから細胞レベルまでのピッチでの誘導を可能とするため、リソグラフィー技術を適用し、ガラス基板上に金属を蒸着することにより格子状電極を開発した。さらに、専用の長期連続培養を可能とする培養カプセル、電位分布を計測するための前置増幅器を開発し、さらに、第4章において開発した汎用生体電位多チャンネル計測システムを適用することにより、[mm]ピッチから平均的な細胞径の50[μ m]ピッチまでの各計測スケールに対応した計測システムの構築に成功した。

本システムを適用することにより、カルスを再分化過程のDC成分の分布を調べた結果、マクロな電位分布のゆらぎがカルスの発生における位置情報の生成に関与している可能性を見出した。さらに、細胞オーダでの計測結果から、隣接細胞において相互影響とも思われる波形相互の関係性が存在していることを示すとともに、インタラクションの結果これらが相互に協調的に振舞うことによりマクロな電場が循環的に形成されてゆくことを示した。また、根の周囲に形成される電場の計測を行った結果、根の周囲の電場が数十分程度の周期でゆらいでいること、目視により生長方向が変化することが確認されるよりも先に、電場のパターンが変化することを見出し、マクロな電場が個々の細胞の制御情報として機能する可能性を示した。

第7章においては、植物生体電位におけるカオスの存在について検討した。

動物などにおける脳波、心電などにカオスが存在することが報告されている。生物の情報システムにカオスが存在することは、生物がより少ない自由度のシステムによって見かけ上多自由度で振舞いうることを意味する。したがって、植物生体電位のAC成分を対象として、相空間図、相関次元、ローレンツプロットなどの処理を試みることによりそのカオス性について検討した。その結果、相関次元は2～5次元となり、さらに、相空間図における多重軌道とローレンツプロットにおける泡状の構造などから、植物においてもカオスが含まれる可能性を示した。

第8章においては、カオス的に振舞う生体電位変化挙動とその相互関係を時間的、空間的に表現する一手段として、多チャンネルの生体電位AC成分を音に変換して聴覚的に表現する手法を考案してシステムを構築するとともに、変換方法や形成イメージに関しての検討を行った。その結果、波形表示のみでは軽視されがちな微細な電位変化成分における関係が顕在化する傾向が認められた。本手法により、従来の波形表示では葉が個別に振る舞っているように見えていた場合でも、葉同士は無関係ではないこと、全体としての旋律、リズムの存在を捉えることが可能となり、生命をはじめとする複雑系からの信号の記述方法としての有効性を確認した。

第9章は、終章として、まず、本研究により得られた植物生体電位計測法の設計原理について提唱した。次に、本研究を通して得られた植物生体電位からみた植物の生体情報システムについて、環境応答と形態形成の両側面についてそれぞれ考察した。最後に、本論文のまとめについて述べた。