長期間水ストレスを与えた植物で発生する アコースティックエミッションについて*

村上 小百合^{*1}, 矢 作 陽 一^{*2}
本 間 恭 二^{*1}, 小 池 卓 二^{*1}

AE Events Issued from the Stem of Plants Under Long Term Water Stress

Sayuri MURAKAMI^{*3}, Youichi YAHAGI,
Kyoji HOMMA and Takuji KOIKE

^{*3} Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, The University of Electro Communications,
1-5-1 Chofugaoka, Chofu shi, Tokyo, 182 8585 Japan

The influence to ecosystem of plant by global warming is investigated. However, few diagnostic technologies by non-destructive inspection to environmental stress are established. Acoustic emission (AE) is applied to the measurement of damage under the water stress of plants. Cavitation phenomena are known by negative pressure under the lack of water in the vessel. Since shock wave due to cavitations issues AE, water stress state of plant can be monitored on real time by measuring AE. In this paper, AE events by the cavitation were measured in drought treated *Ginkgo biloba* L., *Ficus spp.* and *Lycopersicon es.* In all plant, AE events are increased during drought and stopped by supplying water. In *Ginkgo* and *Ficus*, a temporary decrease of AE events was observed during drought. It is presumed that plant adjust internal water balance for self defense by a certain procedure. Stoma closing of the leaf considered being the most effective physiology, however, was not the cause.

Key Words: Acoustic Emission, Water Stress, Draught, Cavitation, Plant

1. 結 言

地球温暖化による環境変化が生態系へ及ぼす影響は大きい。そのためその実態調査が進められているが、植物が受ける環境ストレスを物理的に検出し、診断する技術はほとんどないと言って良い。

種子植物は、葉の光合成によって炭水化物を合成し、根から水分やミネラルを吸収し、これらを維管束と呼ばれる器官（前者は篩部、後者は木部から成る）によって必要な部位へ送る機構を持っている。地中での水分が不足すると多くの生理代謝に異常をきたす。一般に水分が欠乏して植物体に何らかの影響を及ぼすことを水ストレスと呼んでいる。本研究は環境ストレスのひとつである水ストレスに注目し、ストレスの大きさと植物体内で起こる物理的変化の計測量との関係について考察した。

種子植物は、葉の裏面からの水の蒸散作用ならびに根に働く根圧を利用して、維管束のひとつである導管

（または仮導管）を通し、水の凝集力によって根から水を吸い上げている。導管は死んだ細胞である管状組織（仮導管は紡錘状組織）により構成されているもので、土壤に含まれる水分が減少し水の供給が断たれると、水の需給のバランスが崩れて導管内の水柱が切れる。これが回復することなく水柱が切れた状態が一定期間続くとやがて枯死に至る。こうした水の枯渇による水ストレスが発生すると、樹木はホルモンの作用で葉をしおれさせて蒸散作用を停止し、保身する。

水ストレスの初期段階で、導管内に気泡の発生によるキャビテーションが起こることが知られている⁽¹⁾⁽⁶⁾。キャビテーションによる衝撃波が AE (Acoustic Emission) となることから、この AE を圧電センサによって計測することで水ストレスの状態をリアルタイムで知ることができる。これまで AE 法により植物の水ストレス状態をモニタリングする研究が行われている⁽²⁾⁻⁽⁵⁾が、長期間にわたり渇水状態にして昼夜の AE を観測した例はない。

* 原稿受付 2005 年 1 月 19 日。

^{*1} 正員、電気通信大学知能機械工学科 (〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。

^{*2} 電気通信大学大学院知能機械工学専攻。

E-mail: mura-s@mce.uec.ac.jp

本研究で対象とした種子植物は、日本の街路樹として最も多く使われている環境ストレスに対する耐性が高いイチョウ (*Ginkgo biloba* L), また乾燥に強いゴム (*Ficus elastica*), さらに、乾燥に弱いトマト (*Lycopersicon esculentum*) の3種類の植物とした。これらに長期間にわたり水ストレスを与えたときの AE を測定し、AE 発生頻度について調べた。

2. 実験方法

2.1 実験条件

2.1.1 イチョウ イチョウは喬木裸子植物に属し、給水は仮導管によるが、仮導管の機能は基本的に導管と変わらない。約 40 日間給水を断つ短期乾燥実験を 2002, 2003 年の夏季に一回ずつ、2001 年の冬季 (Dec.'01~Mar.'02) に約 100 日間給水を断つ長期乾燥実験を 1 回行った。それぞれの実験で同時に計測する苗木 (3 齢) の数は、使用した AE 測定器 (4 チャンネル) の制約から、2~3 本ずつとした。1 本のイチョウに対して 1~2 箇所に AE センサを設置した。イチョウは直径 23cm 高さ 21cm のプラスチック製容器 (鉢) に栽培し、土壌は市販の有機培養土を使用した。

2002 年の短期乾燥実験では、3 本のイチョウを測定した。2 本は乾燥用として、1 本はコントロール (給水状態) 用に水を 2 日毎に与えたものを用いた。乾燥開始から 40 日目に再び水を与え、水ストレスの回復を調べた。2003 年の短期乾燥実験は個体差を調べるため 2 本とも乾燥用とし、幹に対向する 2 箇所の位置にセンサを設置した。2001 年の長期乾燥実験も同様に 2 本とし、乾燥開始から 90 日目に再び水を与え、AE 事象数の変化を調べた。

2.1.2 ゴム ゴムは被子植物の双子葉類で導管を持つ。2002 年の冬季 (Dec.'02~Mar.'03) に約 100 日間給水を断つ乾燥実験を行った。苗木は 2 本とし、1 本は乾燥用とし、1 本はコントロール用に水を数日毎に与えたものを用いた。ゴムは直径 15cm 高さ 18cm のプラスチック製容器 (鉢) に栽培し、土壌は市販の有機培養土を使用した。

2.1.3 トマト トマトは草本の双子葉類で導管を持つ。2003 年の秋季にトマトの乾燥実験を行った。トマトは縦 58cm, 横 18cm, 高さ 19cm のプラスチック製容器 (プランター) に 2 本栽培し、土壌は市販の有機培養土を使用した。乾燥開始前に 20 日間ほぼ毎日水を与え (コントロール期), 水ストレスを受けてい

ない状態での測定を行い、その後 14 日間給水を断ち乾燥実験を行った。

表 1 に全ての実験の測定条件を示す。なお、表中使用植物の括弧内のローマ数字はイチョウの番号、文字は水ストレス処置の有無を表している (C: control, D: drought)。また、実験期間の括弧内のアラビア数字は乾燥期間を表しており、いずれも十分給水してから乾燥を開始した。

Season	Plant (Treatment)	Period
2001 winter	Ginkgo (VI D, VII D)	99 (89)
2002 summer	Ginkgo (I C, II D, III D)	43 (39)
2002 winter	Indian rubber fig (C, D)	92 (92)
2003 summer	Ginkgo (IV D, V D)	41 (41)
2003 autumn	Tomato (D, D)	36 (14)

Table 1 Condition of the experiment

2.2 実験装置 実験の模式図を図 1 に示す。実験室内に簡易温室を設置した。昼夜にわたり計測を行った。実験室内は暗幕を用いて遮光し、12 時間育成灯 (メタルハライドランプ 250W, 岩崎電気製) を 2 基点灯させることで昼間とした。室温は 25~28℃とした。湿度は夏季の実験においては 40%~55%, 冬季の実験においては 15~30%とした。

Fig.1 Schematic of measuring system

2.3 AE 計測

数百本ある導管内で発生するキャピテーションに伴う AE エネルギーの放出は微弱であり、細胞組織内での減衰も大きいため、AE の伝播距離は数センチメートルに留まる。このため 1 箇所が発生した AE を近接した複数のセンサで同時に計測出来ないことも多い。直

Fig. 2 Typical AE wave form

Fig. 3 Relation between AE event and lapse of time for short time data

径約 10mm の幹に対向して 2 個のセンサを設置した場合でも、1 個のセンサ直下で発生した AE 事象が両方のセンサで同時計測されていないことがある。センサは 300kHz 共振型 AE センサ (M31, 富士セラミックス社製) を用いた。センサ設置位置は、土壌表面から約 5cm の位置とし、2 箇所に AE センサを設置する場合は、幹に対向する 2 箇所の位置に設置した。AE センサの取り付けは、幹との間にゼリーを介してバネで圧着した。押付力は 8.8N とした。樹皮表面は平坦ではないためセンサの圧着状態が異なるほか、伝播経路によって AE 波形そのものが若干変化する。このため、センサの校正は左右二つのセンサから等距離の点でセンサと同一水平面から高さ 20mm の位置においてシャープペンシルの芯を幹の表面で数回圧折し、その最大振幅が一定となるようセンサの取り付けを微調整した。AE センサからの信号はプリアンプ (1220A, PAC 社製) で 40dB 増幅し、AE 測定器 (Disp-80, PAC 社製) に取り込み、PC により演算処理を行った。

なお、しきい値は高周波ノイズより 1dB 高く設定した。波形を周波数解析して、パルス状波形、数十 kHz 以下の低周波を持つものおよび明らかにノイズと判定された波形を除き、ここでは AE 信号と見なされ

Fig. 4 AE events-lapse of time curve (2002 summer, Ginkgo I, Ginkgo II)

Fig. 5 AE events-lapse of time curve (2002 summer, Ginkgo III)

る波形のみを計数している。図 2 に植物から発生する AE 信号の一例を示す。

3. 実験結果と考察

3・1 短期乾燥実験による AE 事象数の変化

3・1・1 イチョウ イチョウの短期実験データを図 3 に示す。AE 事象数そのものは個体差が大きい、全体的な傾向として乾燥開始後 20 日前後で AE が増加しているため、この時期にキャビテーションが増加していると考えられる。この中の代表的な例を示す。図 4, 5 は 2002 年夏季のイチョウの実験における 1 日当りの AE 事象数と経過日数との関係を表す。

水を与え続けているイチョウ I (コントロール) からは AE は発生しない (図 4)。一方、乾燥させたイチョウ II, III では、乾燥初期に AE はほとんど発生しないが、徐々に増加し、ピークを迎えた後、一時減少する。これはイチョウが何らかのホルモンを分泌して導管内の水分調節を行い、一度増えたキャビテーションの発生率を下げたためと考えられるが、詳細は明らかでない。図 5 に示す ch1, 2 は対向する 2 箇所の位置に設置した AE センサを示している。AE の増加傾向は同じものの、発生数は 3 倍程度の差異が生じた。導管

は茎の外周に存在するので、同じ高さにセンサを設置したとしても、検出される発生数は異なる。

なお、イチョウの葉は落葉したものの、実験後に給水を続けた結果、翌年新芽を出した。

3・1・2 トマト 2003年秋季に行ったトマトの実験において1日毎のAE事象数の変化の一例を図6に示す。グラフでは乾燥開始日を0日目とし、それ以前の水を与えていた時期（コントロール期）はマイナスで表した。コントロール期ではAEはほとんど発生していない。乾燥開始後も9日目までAEはほとんど発生していないが、10日目以降急激に増加し、14日目に茎の膨圧が低下してセンサが保持できなくなったため、実験を終了した。AE増加の割合はイチョウに比べ著しい。

Fig.6 Relation between AE events and lapse of time (Tomato)

3・2 長期乾燥実験による AE 事象数の変化

3・2・1 イチョウ 図7は2001年冬季のイチョウVI, VIIについての実験における1日毎のAE事象数を示す。乾燥開始から40日前後までは短期乾燥実験と同様な傾向を示しているが、45~50日目に著しくAEが増加し、その後急激に減少する。減少後は、それ以前の増減を繰り返す傾向とは明らかに異なっており、また図4に示したような水を与えた反応とも異なっている。乾燥開始から90日目に水を与えたが変化はなく、依然少数のAEが発生している。短期乾燥実験において40日間乾燥させたイチョウは落葉したものの、その後給水を続けた結果、翌年新芽を出したが、長期乾燥実験で使用したイチョウは枯死した。おそらく45~50日目の急激なAE事象数の増加時に多くの導管内の水柱が分断されて、枯死したと思われる。

3・2・2 ゴム 2002年冬季のゴムの実験における1日当りのAE事象数を図8に示す。

Fig. 7 AE events-lapse of time curve (2001 winter, Ginkgo VI, VII)

Fig. 8 AE events-lapse of time curve (2002 winter, Indian rubber fig)

イチョウと同様、コントロールではAEの発生は見られない。乾燥させたゴムでは35日目あたりからAEが増え始め、その後急激に増加し、50~60日目にかけて1日に5000を超えるAEが発生した。60日目以降、AEは徐々に減少していき、75日目にはほとんど現れなくなる。使用したゴムは長期乾燥実験のイチョウ同様、その後葉をつけることはなかった。75日目以降、AEは少ないが1日に500近くのAEが見られ、コントロールの傾向とは異なっている。このようにゴムのAE事象の発生傾向はイチョウと同様である。なお、途中測定できなかった期間を図中に波線で示した。

3・3 土壌の含水率とAE発生との関係 乾燥は土壌中の水分量の減少を意味する。そこで土壌の含水率とAE発生との関係を求めた。図9~図11に示すようにイチョウ、ゴム、トマトはいずれも乾燥開始時点で50%の含水率を示していたが、20%まで減少する時間はゴムとトマトが10日間、イチョウが20日間となっている。イチョウとトマトは含水率が20%に達した時点でAEの急増が認められた。イチョウはさらに含水率が減少してもAEは20日以上発生し続けたが、トマトは数日AEが発生したのち枯死した。それに対してゴムは20%の含水率でAEは発生しなかった。さ

らに含水量が減少し、0%になり5日経た後、AE事象数が徐々に増加して行くことが分かる。このことから、水ストレスに対し、ゴムはしばらく生命を維持する機能を持っているのに対し、トマトはその機能を持っていないと見られる。イチョウはその中間で、比較的乾燥に強いと言える。

Fig. 9 Relation between water content and AE events. AE events activate to start at 25% water contents. (Ginkgo)

Fig. 10 Relation between water content and AE events. AE events activate to start at 40% water contents. (Tomato)

Fig. 11 Relation between water content and AE events. AE events activate to start at 0% water contents (Indian rubber fig)

3-4 AE事象出現の昼夜間の比較 キャビテーションは植物の蒸散による水の損失が原因で起こるため、通常は蒸散が活発な日中に多く発生し、光が当たらなくなる夜間にはあまり発生しないと考えられるが、水ストレスが進行するにつれて夜間においてもAEが発生した。

図12に2002年夏季のイチョウⅢの1日当りのAEが夜間に発生する割合を示す。乾燥初期にAEは主に日中に発生するが、徐々に夜間に発生する割合が増加し、20日目前後にはおよそ40%となる。図5と比較すると、1日当りのAE事象数が急激に増加する以前に、夜間のAE事象数の割合が増加する。このとき既にイチョウは多くの水ストレスを受けており、ホルモンの作用で葉からの蒸散作用を停止したことから、夜間のAE発生割合が増えたものと考えられる。20日目以降は夜間の割合が40%の状態が続き、それ以上夜間の割合が増えることはなかった。40日目に水を与えた後は、夜間のAEはほとんど見られなくなり乾燥前の状態に戻った。夜間に発生するAE事象数の割合を調べることで、渇水状態にあることをより早く知ることが出来る。

Fig. 12 AE event rate-lapse of time curve (night 2002 summer, Ginkgo III)

Fig. 13 AE event rate-lapse of time curve (night 2001 winter, Ginkgo VI)

次に2001年冬のイチョウVIでAEが夜間に現れた割合を図13に示す。40日目までは日中のAEの割合が若干多いものの、図12の結果と同様の傾向を示している。しかし、45～50日目の1日当たりのAE事象数が急激に増加した後(図7)、急激に減少した状態においても昼夜の割合はほぼ6:4のままであり(図13)、90日目に水を与えても夜間のAE事象は減少しない。

植物体内での水の移動(吸水)は、導管内部の水ポテンシャルが土壌中のそれよりも低い時に生じる。根による吸水方法として、地上部の蒸散が引き金となって起こる受動的吸水と、根が土壌から積極的に糖質、カリウム、ナトリウム等を取り込むことで根圧を生じさせることにより吸水を行う能動的吸水がある。水を与えると、土壌中の水ポテンシャルが高くなるため、水の移動が生じるはずである。しかしながら、長期の乾燥実験において、水の移動が起きなかったことを示している。このことから、ある一定期間渇水状態におかれた植物は、根における能動的吸水のための機能を失い、その後、吸水を行うことができなくなると考えられる。

4. 結 言

本研究は、3種類の植物に対して長期間渇水状態にさらした水ストレス期間と植物体内で起こる物理的変化の計測量であるAEとの関係について調べた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) イチョウ、ゴム、トマトを対象に、土壌への水分の供給を停止することで水ストレスを与えた結果、いずれの植物においても乾燥の経過と共にAEが発生した。
- (2) 乾燥耐性が高いゴムは、土壌の含水率が0%となってもしばらくはAEが発生しないが、乾燥耐性が低いトマトは、含水率が20%に達した時点でAEが急増し、枯死した。比較的乾燥耐性のある

イチョウは、AEが発生してからしばらく経過した後も、水を与えてAEの発生が止まる場合は、葉が落葉したとしても、枯死しないことがわかった。

- (3) イチョウとゴムにおいて、乾燥期間中AEの一時的な減少が見られた。これは、植物自身が自己防御のため何らかの方法で導管内の水分調節を行ったものと考えられる。
- (4) イチョウとゴムで枯死に至るまで乾燥を続けた結果、イチョウでは乾燥開始より45～50日目に、ゴムでは45～60日目にそれぞれAE事象数に著しい増加が見られ、その後急激に減少した。減少後もAEが生じ、水を与えてもAEの発生は停止しなかった。イチョウ、ゴムともに後日再生することがなかったことから、長期的に渇水状態におかれることにより、根における吸水機能が失われたと考えられる。

文 献

- (1) J. A. Milburn, et al: *Planta*, Vol. 69, pp 43-52 (1966)
- (2) Robert A., et al: *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 9, No. 3, pp 42-46 (1990)
- (3) Keiichi Sato, et al: *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 13, No. 1/2, pp 42-46 (1995)
- (4) G. E. Jackson, et al: *Tree Physiology* Vol. 15, pp 791-798 (1995)
- (5) J. S. Sperry et al: *Tree Physiology* Vol. 17, pp 275-280, (1997)
- (6) M. T. Tyree: *Journal of Experimental Botany*, Vol. 48, No. 315, pp 1753-1765 (1997)