

作物の環境適応力を引き出す自然農法の技術

根系部分乾燥刺激がトマト収量、

品質および耐病性の改善に与える効果

徐 会連（研究部）

はじめに

自然農法では土と種を非常に重要視している。本研究において、植物の種子が備え持つ力について、根系部分乾燥（Partial Rootzone Drying、以下、PRD）処理を早魃^{かんばつ}刺激として与え、植物の健康を支配する一連の遺伝子の活性化を把握することにより、生理活性が改善するかどうか確認した。まず1. ポリ鉢で栽培するトマト幼植物でPRD処理に関する生理活性の改善を確認しそのメカニズムを解析した。つぎに圃場試験でPRD処理によって浸透調整を誘発し大玉トマト品種の収量および耐病性を高めることや果実の品質が改善することを確認した。さらに2.

小ポット栽培試験でトマトはPRD刺激に応答した結果、ストレス応答遺伝子が上昇発現を表し浸透調整とそれに関わる生理活性を増強することが確かめられた。すなわち、トマトはPRD刺激に応じて、環境危機シグナルを植物体の遺伝子制御システムまで伝達し、遺伝子上昇発現に由来する一連の調整を行い、生理活性が高まり環境ストレスにも病気にも強くなる結果、果実収量を高めたと考えられた。作物学、植物生理生化学と分子生物学の各レベルで、自然農法哲学に暗示されるように、DNAから蘇る偉力、つまり種の持つ力として、部分乾燥刺激を与えることで遺伝子の働きを活性化できることが証明された。

種の能力を支配する遺伝子は怠け者？

自然農法の哲学によると、土の偉大な能力と種の偉大な能力（以下、偉力）を発揮させれば、自然は豊かな恵みを与えてくれる。地球における46億年の悠久の歴史の中で、大自然は多くの生き物を産み育て、豊かな海と大地を創造してきた。生きものを生み出す力を持つ大自然は地球上に生存するすべての生き物を養うこともできるはずである。その可能性の秘密は土壌と種（植物）にある。地球上で生物が進化した期間に比べ、人類の歴史は短く現代科学の歴史は僅かではない。人類が大自然の仕組みを認識する能力と範囲は、

自然の仕組みそのものに比べまだまだ小さい。例えば、生物の遺伝子を解明したのは、わずか数十年前のこととて、その後に生物の遺伝子を組み換え始めた。もちろん、それ以前にも人類はいろいろな面で自然に挑戦し続けてきた。

農業の面では、自然の仕組みに順応せず大量の農薬、除草剤と化学肥料を用い人類が依存するべき環境と自然を破壊してきた。その中で顕著なことは土と種にまつわる肥毒という問題である。肥毒によって土壌の硝酸イオン濃度を過剰にし土壌と河川の汚染（Anjana and Iqbal 2007）、土壌物理化学性と生物性の破壊、それに由来する食品の汚染と品質低下を引き起こした。



PRD 刺激により病気を軽減した区 (写真上) と病気の罹病率が高い通常灌水区 (写真下)

種にある肥毒とは何なのか、または種の持つ偉力とは何なのか、判らないことが多い。ここで著者らが想定したのは、種の持つ偉力はいわゆる生命力を支配する遺伝子の働きである。自然は植物にすべての性状(耐病性、甘い等)を支配する遺伝子を仕組んである。近年の研究で判ってきたことは、DNAの塩基配列によって数十億、遺伝子は数万、数十万種類の性徴を制御している。明らかな性状を支配する遺伝子は全体遺伝子の2%しかない。他の98%の遺伝子は働かずに寝ている(Claverie 2005)といわれる。ゴミ遺伝子ともいわれたが、決してゴミではないであろう。著者らの研究の結果では、現代化学農業が始まって以来、肥料や農薬を多投して収量は

かなり追求してきたため、その2%の遺伝子の相当部分は怠けた状態になつて眠っていると考えられる。例えば、耐病性がなくなったり、果実が甘くならなくなったりすることは、耐病性と甘さを支配する遺伝子を失ったのではなく、それらの働くべき遺伝子は用がなく眠ってしまったのである。こういう遺伝子鈍化現象が種にある肥毒の一種ではないだろうか。

本来、植物のDNA中には耐病、耐旱、多収と良質などを支配する必要な遺伝子が組み込まれている。但し、長期間の人工栽培で多肥、灌漑、農薬を使うことで、植物が持つ自立本能に係る遺伝子の働きを怠けさせた。それに対して、化学物質、放射能とホルモンの代わりに、自然要素を使つて植物を瞬間的に刺激して、鈍化している遺伝子を活性化することが期待できる。この理論の基礎となるのは、植物が環境条件の悪化を感知し、シグナルを遺伝子まで伝達し、該当する遺伝子を活性化して植物体が元気になる一連の応答反応(Guo and Wang 2011)にある。刺激の方式のうち、実施しやすいのは土壤乾燥、低湿、塩漬と強光照射のような早魃要因である(Xu 2007)。これは植物生産におけるシグナル伝達と旱生生理学の応用で、作物の環境適応力を引き出す自然農法の技術の開発につながる。

一方、植物はある感覚を持つて環境条件の変化を感知することができる。危機感に由来するシグナルをDNAまで伝達し、該当する遺伝子を活性化して悪条件に抵抗する一連の応答反応が起る。しかし、刺激が本当の悪条件に由来するかどうかは、植物には識別できないため、軽い土壤乾燥、低湿、塩漬と強光照射のような早魃要因による刺激を与え植物の健康を誘導することが期待できる。作物の畝の両側を交互に灌水する処理、つまり根系部分乾燥処理は、葡萄のような果樹園で果実収量を顕著に高め、果実の品質も改善した(De La Hera et al. 2007; Dry et al. 1996)という研究が多数報告されている。しかし、この効果に関する詳しいメカニズムはまだ解明されていない。

そこで、著者らは岡田茂吉師の自然農法哲学における種の持つ偉力と種にある肥毒に関する理論を実証するため、また技術となる刺激効果のメカニズムを明らかにするため、根系部分乾燥刺激がトマトに与える収量向上、品質改善と耐病性増強効果(Xu et al. 2009a)について一連の解析を行った。以上の現象の確認、お互いの関係の解明と理論的な解釈が本研究の目的となる。段階的に現象確認と機作解明を詳しくするため、トマトを対象作物としていくつかの試験を行った。

早魃刺激がトマトの生理活性を高めるメカニズムと遺伝子発現の関係

1. ポリ鉢と圃場における根系部分乾燥がトマトの生育と収量に及ぼす影響

ポリ鉢試験では、対照区に比べ、桃太郎においては部分乾燥処理（PRD）の果実収量は顕著に高かったが、ミニトマトの千果では増収効果はみられなかった（表1）。千果において、PRD処理は受粉に影響を与え、株あたりの果実数が顕著に減ったため、収穫時の果実サイズを大きくしても収量を高めることはできなかった。これはミニトマトの収量が果実数によって決まるからである。ただし、ミニトマトや土壌乾燥に弱い品種に対しては、PRD処理に敏感に反応することが示唆された。光合成速度も果実収量と同じ傾向で桃太郎においてPRD処理によって促進されたが千果ではこの促進効果はみられなかった（表2）。

圃場試験では、果実の品質を表す可溶性糖（蔗糖、果糖と葡萄糖）、有機酸（リンゴ酸とクエン酸）およびビタミンC（L-アスコルビン酸）のいずれの含量もPRD処理区で対照区より高く、PRD処理が果実の品質を改善する効果を示した。これらの成分は可溶性なので、後述する浸透調整に貢献したともいえ、またはこれは浸透調整の結果の1つともいえる。水分が飽和する時の葉の浸透ポテンシャル（ Ψ_{FT} ）はP

表1 交替灌水処理が異なるトマト品種の果実収量と品質に及ぼす影響

処理区	品種：桃太郎						品種：千果					
	収量 (g/株)	果数 (果/株)	果サイズ (g/果)	糖	酸	Vc	収量 (g/株)	果数 (果/株)	果サイズ (g/果)	糖	酸	Vc
				(g kg ⁻¹)						(g kg ⁻¹)		
対照	2729	31.2	87.5	51.3	8.36	0.128	2600	336	7.74	45.2	7.87	0.117
PRD	3686	36.5	101.0	63.1	9.89	0.143	2543	277	9.18	54.6	9.23	0.136
間差	**	*	*	**	*	*	ns	*	*	*	*	*

表2 交替灌水処理が異なるトマト品種の光合成活性に及ぼす影響

処理区	品種：桃太郎				品種：千果			
	P_C	R_D	K	Y_Q	P_C	R_D	K	Y_Q
	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		($\text{m}^2 \text{s mmol}^{-1}$)	(mol mol^{-1})	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		($\text{m}^2 \text{s mmol}^{-1}$)	(mol mol^{-1})
対照	21.5	2.43	0.00205	0.04395	24.5	3.16	0.00290	0.07105
PRD	29.0	3.30	0.00255	0.07395	26.6	3.09	0.00260	0.06903
間差	**	*	*	**	*	ns	ns	ns

表3 P-V 曲線解析結果

処理	Ψ_{FT}	π_{FT}	$\pi_{\text{s+a}}$	π_{IP}	P_{FT}	C_{osm}	ΔC_{osm}	ζ_{apo}	ζ_{sym}	ζ_{IP}
	(MP)					(osmol m ⁻³)				
品種：桃太郎										
対照	-0.21	-1.09	-0.84	-1.53	0.88	446.9	0	0.21	0.79	0.69
PRD	-0.22	-1.16	-0.95	-1.61	0.94	475.6	28.7	0.17	0.83	0.63
間差	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*
品種：千果										
対照	-0.24	-1.02	-0.82	-1.49	0.78	418.2	0	0.22	0.78	0.71
PRD	-0.25	-1.07	-0.87	-1.54	0.82	438.7	20.5	0.19	0.81	0.67
間差	ns	*	*	*	*	*	*	*	*	*

表4 PRD 処理がトマトの葉枯病に及ぼす影響

処理	品種：桃太郎		品種：千果	
	株罹病率 (%)	罹病度 (%)	株罹病率 (%)	罹病度 (%)
対照	59.7	19.3	34.5	18.6
PRD	28.6	65.7	75.9	41.1
間差	**	**	**	**

表内の記号に関する説明

* は 0.05 水準、** は 0.01 水準、ns は有意差がなかったことを表す。
N は窒素追肥 (0.15g N / kg dried soil) を表す。
その他の記号とその定義は 43 ページ別表を参照。



R D 処理によって低下し、葉の膨圧は高くなった（表3）。このことに関連して、P R D 処理を受けたトマトの葉の細胞中の溶質濃度が高まること、 π_{FT} から計算した溶質濃度の絶対増加量（表3： C_{osm} と ΔC_{osm} ）からも追認された。P R D 処理を受けたトマトの葉の細胞水分は原形質に分配する割合（共質水： ζ_{sym} ）が高く、細胞壁に分配する割合（異質水： ζ_{apo} ）が低かった（表3）。細胞質が細胞壁と分離する時の葉の浸透ポテンシャルと葉の相対含水率共に、P R D 処理によって低下した（表3）。葉枯病も P R D 処理区で軽かった（表4）。収量には反映されないが、浸透調整は千果においても誘発されていた。

2. トマトの根系乾燥がストレス応答遺伝子の活性化に与える影響

小ポット試験では、トマト植物は P R D 刺激に応答し、浸透調整が起こるが、詳細に見ると、同じ水分レベルの状態でも P R D を経験するトマト植物体は、高い細胞質内の溶質濃度、高い葉膨圧と高い原形質水分割合を示すことが判った（表5・表6）。

早魃刺激を受けると能動的に溶質を蓄積して外部悪環境に対抗する仕組みが働いている。これは P R D の刺激に反応してストレス応答遺伝子 D R E B の上昇発現を行った結果と思われた。ストレスあるいは危機刺激のシグナル物質として、活性酸素の濃度は処理当初高かったが、活性酸素分解酵素

表5 根系部分乾燥刺激に反応するトマトの葉の浸透調整に関わるパラメータ（P-V 曲線法）

処理		Ψ_{FT}	π_{FT}	P_{FT}	Ψ_{MD}	π_{MD}	P_{MD}	π_{s+a}	π_{IP}	ζ_{IP}	ζ_{sym}
PRD	N	(MPa)									
—	—	-0.207	-0.753	0.546	-0.701	-1.074	0.373	-0.701	-1.017	0.882	0.783
—	N	-0.206	-0.769	0.563	-0.693	-1.052	0.359	-0.719	-1.025	0.883	0.786
PRD	—	-0.221	-0.873	0.652	-0.703	-1.186	0.483	-0.811	-1.109	0.895	0.810
PRD	N	-0.224	-0.869	0.645	-0.711	-1.191	0.481	-0.821	-1.112	0.896	0.821
PRD		*	**	**	ns	**	**	*	*	*	*
N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PRD × N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

表6 根系部分乾燥刺激に反応するトマトの葉の細胞浸透濃度（ C_{osm} ）と対照区に比べる増加量（ ΔC_{osm} ）（P-V 曲線法）および実測した可溶性糖の濃度および硝酸還元酵素遺伝子とストレス応答遺伝子（DREB）の発現

処理		C_{osm}	ΔC_{osm}	可溶性糖（ $g\ kg^{-1}$ ）		硝酸還元酵素遺伝子		ストレス応答遺伝子	
PRD	N	($osmol\ m^{-3}$)		早期	後期	早期	後期	早期	後期
—	—	308.7	0.0	330	271	1.00	0.27	1.00	1.33
—	N	315.3	6.6	423	322	1.53	1.51	0.98	0.85
PRD	—	357.9	49.2	424	335	0.91	1.89	1.86	4.33
PRD	N	356.3	47.6	499	406	1.57	4.32	1.48	1.85
PRD		**	**	**	**	**	**	*	**
N		ns	ns	*	*	*	**	ns	**
PRD × N		ns	ns	*	*	*	*	*	*

表7 根系部分乾燥処理を受けたトマト幼植物のバイオマス生産、光合成活性、可溶性タンパク（酵素量を示す）と硝酸還元酵素の活性

処理		乾物	P_C	R_D	Y_Q	可溶性タンパク（ $g\ kg^{-1}$ ）		硝酸還元酵素活性（ $\mu\ mol\ h^{-1}\ g^{-1}$ ）	
PRD	N	($g\ pl^{-1}$)	($\mu\ mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)		($mol\ mol^{-1}$)	早期	後期	早期	後期
—	—	0.304	15.2	1.42	0.0374	4.29	4.21	0.32	0.49
—	N	0.326	16.3	1.63	0.0361	4.98	4.91	0.51	0.59
PRD	—	0.321	17.2	1.73	0.0422	4.08	4.62	0.39	0.52
PRD	N	0.342	17.9	1.77	0.0415	5.06	5.41	0.59	0.69
PRD		*	*	*	*	*	*	*	ns
N		*	*	*	ns	**	**	*	**
PRD × N		ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns

表8 根系部分乾燥処理を受けたトマト幼植物が刺激に対する応答を表す活性酸素 (O_2^-)、マロンジアルデヒド (MDA) およびプロリンの濃度の上昇

処理		O_2^- ($\mu\text{mol/g FW}$)		MDA ($\mu\text{mol/g FW}$)		プロリン ($\mu\text{g/g FW}$)	
PRD	N	早期	後期	早期	後期	早期	後期
—	—	1.31	1.81	8.53	7.64	3.48	2.87
—	N	1.06	1.56	8.60	7.47	3.25	3.77
PRD	—	1.98	1.92	8.43	7.25	6.92	3.53
PRD	N	1.66	1.79	8.57	7.37	9.31	3.28
PRD		**	*	ns	ns	**	ns
N		*	*	ns	ns	ns	ns
PRD $\times$ N		ns	ns	ns	*	**	ns

表9 根系部分乾燥処理を受けたトマト幼植物のスーパーオキシドディスムターゼ (SOD)、ペルオキシダーゼ (POD) とカタラーゼ (CAT) の活性の変化

処理		SOD ($\text{U g}^{-1}\text{FW}$)		POD ($\text{U g}^{-1}\text{min}^{-1}$)		CAT ($\text{U g}^{-1}\text{min}^{-1}$)	
PRD	N	早期	後期	早期	後期	早期	後期
—	—	191	426	2600	2133	0.875	0.265
—	N	265	638	2308	1908	0.900	0.305
PRD	—	351	475	3008	2733	0.900	0.650
PRD	N	493	583	3092	2975	0.987	0.475
PRD		**	ns	**	**	ns	**
N		**	**	ns	ns	ns	ns
PRD $\times$ N		*	ns	ns	*	ns	*

(SOD) の活性が高くなるに伴って減少した(表7・表9)。硝酸塩施肥に応じて硝酸還元酵素遺伝子は上昇発現を示し、硝酸還元酵素の活性も高くなった(表7・表8)。こうした仕組みで、葉の光合成能力は強くなった(表7)。これまでの研究で、仮の早魃(土壌部分乾燥、強光、低湿)刺激は落花生、トマト、ソルガム、馬鈴薯などの作物の健康強壮、多収と良質を誘発することが判っている。本試験では、部分あるいは軽度の乾燥を加えることで、トマト作物の強壮と良質を誘発するメカニズムを明らかにした。つまり、刺激に応じて環境危機シグナルを植物体の遺伝子システムまで伝達し、ストレス耐性遺伝子群の働きを調節しているDREB遺伝子が、他の各遺伝子の発現を促進する。従って一連の調整の結果、早魃刺激葉の膨圧を高め、病害を軽減あるいは避けることができたといえる。

植物の種子が持つ偉力の解明と自然農法技術への応用

自然農法の哲学を読み替えると、過剰施肥によって作物の種に本来活躍している遺伝子が鈍化してしまうといえる。この遺伝子の鈍化が肥毒

表現の一つであろう。もちろん岡田茂吉師が種に肥毒があると指摘したのはDNAと遺伝子の働き方がまだ解明されていない時代であった。この予見性こそ哲学の最大の力といえる。例えば、宇宙大爆発(ビッグバン)理論とDNAが生物の特性を定めるといった仕組みは、東洋哲学の《道德経》と《易経》にも既に示唆されている。岡田茂吉師の原著にこういう言葉がある。「玉蜀黍はもとよりすべての種子も最初は肥毒を含んでいるから、一、二年は成績が思うようでないが、三年目くらいから目立って良くなるのである。土に肥毒なく種子にも肥毒のない玉蜀黍は茎は非常に太く、水の垂るような葉の青さで、日当たり良く水切れのない土地であれば結実がよく、実の棒は長く、粒は隙間のないほど密集し、列が正確で口に入れるや柔らかく甘く、一度口に入れるや忘れ得なくなるのである。」「まず一、三年は辛抱してその後を待つべきであって土および種子の肥毒が消滅するに従って土は偉力を発揮するのである。」(自然農法73号 48〜50ページ「無肥料栽培」参照)

今の有機JAS認定も3年を要するのは、肥毒が消滅し土が偉力を発揮する時期を待つことに通じる。植



PRD 処理の様子：株を中心に、左右交互に灌水することを繰り返す

の変化を感知し、先ずシグナル物質が生成され、一連のシグナル伝達連鎖を通じて、危機情報を DNA まで送る (Davies et al. 1994; Knight and Knight 2001)。そこに眠っている遺伝子が活性化して伝令 RNA へ転写し細胞核から細胞質まで移動して目的の酵素を合成する。

例えば、トマトと他の果物の場合、ストレスあるいは危機を感じて先ず子孫を残すため、果実を赤く、また甘くして動物に食べさせ、動物の消化管と糞を通じて種を散らす。これはほとんどの植物の本能である。マクワウリのような植物で種が発芽できない時に果実が苦く、発芽する準備が整うと果実は甘くなつて

物は動物と違って、環境が悪化しても他所に移動することはできず、同じ場所に止まって適応しなければならぬ。多くの植物が長い年月をかけて、酸素が豊富で水の不足する陸地に適応し、特に早魃に対して一連の適応メカニズムを獲得してきた。つまり、植物は周りの環境

且つ綺麗な色と美味しい香を發する。これは動物を誘引して実を食べさせ、体内を通じて種を遠くへ運ばせる。いわゆる子孫を残すためである。人間は植物のこのような本能を利用して瞬間的なあるいは危機刺激を与え、欲する果実の収穫が期待できる。植物の感覚では刺激の真偽を

識別することは難しい。これは本研究の根拠によるところである。本文に報告したのは、トマトが PRD 処理の刺激に応じて危機あるいはストレス応答遺伝子 (DREB) が活性化して、浸透調整と酸化活性化と耐病性増強などの作物の健康に関連する一連の調整をした。それにしても、ミニトマトでは、大玉トマトと同じように浸透調整を誘発させても、果実収量は有意に増加しなかった。逆に PRD 刺激は果実の数を減らしたが、果実が減った理由は、刺激によるシグナル物質、例えばアブシジン酸が増えて、受粉に影響を与えた可能性がある。

こうした現象は、一連の生化学反応に有利となる (Patakas and Ntitsakis 1997) ことが考えられた。また PRD 処理を受けたトマト植物が水ストレスに強い (Auge and Stodola 1990) 結果を支持している。要するに、部分乾燥 (交替灌水) 処理を受けたトマト植物は、環境ストレスのシグナルを受けて浸透調整を含む内部適応調整をおこなった結果、生理活性が高まって環境ストレスにも病気にも強くなり、その結果、果実収量を高めたことが考えられた。ただし、水ストレスの刺激に弱い品種を栽培する時に、乾燥処理の程

度に気をつける必要がある。同様の事例は、馬鈴薯の PRD 栽培の結果でも見られる。PRD 処理を生育後期に行うと、根系の半分を占める片側土壌の乾燥であっても、芋の肥大生長に悪影響を与え収量を減らした (Xu et al. 2011)。作物また品種によって PRD 処理をする時、個別に注意する必要がある。

類似している偽の早魃刺激には、落花生と高粱の胚軸またニンニク、チューリップとグラジオラスの球根を空中に曝す処理 (Qin et al. 2009) や、暗黒下トマト個体群冠層内に与える LED 藍光照射 (Xu et al. 2012)、さらに、コムギとニンニクの苗を失水させてから移植、馬鈴薯種芋の切り口を乾燥させてから植え付け、水耕するトマトに与える高 EC 栄養液に由来する瞬間塩漬刺激 (Xu et al. 1995) などが挙げられる。これらの処理は、本当のストレスではなく、偽の早魃刺激である。

これらの技術的な応用が、当センターの研究者によって提唱され、新しい学問として Xerophytophysiology (植物旱生生理学) と名づけられた (Xu 2007)。PRD の場合、短期間、一部の根系が乾燥土壌にあるが、残りの根系が湿潤な土壌に入っていて充分吸水す

ることができる。このような土壌乾燥処理は厳しいストレスにならないうちに、灌水を再開し、植物の根と植物全体に傷害を与えないことが前提となる。こういう根系部分乾燥刺激また交替灌水のやり方は、すでに農業技術（PRD技術）として葡萄のような果樹園と果菜類の栽培で応用されている（Souza 2004; Savic 2004; Xu et al. 2009b）。増収をもたらすかどうか別にして、品質の改善と節水による生産コストダウンは明確に再現できる（Chaves and Oliveira 2004）。例えば、落花生胚軸と球根を光と乾燥空気に曝す処理の時に主根は湿潤な土壌にあり、植物株全体に傷害は与えない。もちろん、LED藍光照射の場合、ただ強光要素である藍光を早魃のシグナルとして植物体を与えている（Xu et al. 2012）。

これまでに普及した農業技術では、果樹またはトマト冠層下に置く反射マルチがある。反射マルチの目的は補光ではなく、ただ葉の下面に早魃の要素となる短波光のシグナルを過剰に与えるだけである。実際に桃園にもリンゴ園にも盛夏で光は足りないのではなく強すぎで未熟の果実に火傷を与える場合もよく見られる。スイカの産地として有名な松本

市周辺の西瓜トンネル栽培は実際に一種のPRD技術が使われている。西瓜の苗の定植位置は1・3m幅の被覆ビニルの片側で、被覆がない湿潤な土壌から水分を吸収し、一部の根系は被覆内の相対的に乾燥する地表に伸びる。また、ビニルマルチは土壌からの蒸発を遮断し、昼ごろにトンネル内は高温と乾燥状態になり、夜はトンネルビニルの両側を開けているので、温度が急降下する。この環境は、世界一低標高の中国新疆のウイグル自治区のトルファン盆地の砂漠気候を再現するかのようだ（トルファンはスイカの名産地）。

これから、当センターで、シグナル伝達と植物早生生理学の理論を基にして、続々と新しい刺激栽培方法を試験的に実証するよう計画している。日本のような湿潤な気候であれば、今日までの研究成果とする早魃対策理論も応用することができ。また、本研究は、作物学、植物生理生化学と分子生物学の各レベルで、自然農法哲学に暗示されるように種の偉力、つまりDNAから掘り出す活性化可能な遺伝子の存在を証明することができたといえる。

引用文献

- Anjana, S.U., Iqbal, M. 2007. Nitrate accumulation in plants, factors affecting the process, and human health implications. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 27:45-57.
- Auge, R.M. and Stodola, A.J.W., 1990. An apparent increase in symplastic water contributes to greater turgor in mycorrhizal roots of droughted Rosa plants. *New Phytologist* 115:285-295.
- Chaves, M. M. and Oliveira, M.M. 2004. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. *Journal of Experimental Botany* 55(407): 2365-2384.
- Claverie, J.M. 2005. Fewer genes, more noncoding RNA. *Science* 309 (5740): 1529-30.
- Davies, W.J., Tardieu, F. and Trejo, C.L. 1994. How do chemical signals work in plants that grow in drying soil? *Plant Physiology* 104:309-314.
- De La Hera, M. L. Romero, P., Gomez-Plaza, E. and Martinez, A. 2007. Is partial root-zone drying an effective irrigation technique to improve water use efficiency and fruit quality in field-grown wine grapes under semiarid conditions? *Agricultural Water Management* 87: 261-274.
- Dry, P., Loveys, B., Botting and D., During, H. 1996. Effects of partial root-zone drying on grapevine vigour, yield, composition of fruit and use of water. *Proceedings of ninth Australian Wine Industry Technical Conference*, 129-131.
- Knight, H. and Knight, M.R. 2001. Abiotic stress signaling pathways: specificity and cross-talk. *Trends Plant Sci.* 6:262-267.
- Patakas, A. and Noitsakis, B., 1997. Cell wall elasticity as a mechanism to maintain favorable water relations during leaf ontogeny in grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 48:352-356.
- Qin, F.F., Xu, H.L., Tan, J.Y., Zhu, Y.B. and Wang, H.Y. 2009. Effect of clove exposure on growth and yield of garlic. *Horticulture Research* 8 (Ex. 2):470.
- Savic, S. 2004. Effect of partial root drying on growth and photosynthesis of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Journal of Agricultural Sciences* Vol: 49: 1-11.
- Souza, C.R., Maroco, J.P., Chaves, M.M., Santos, T., Rodriguez, A.S., Lopes, C., Rodrigues, M.L. and Pereira, J.S. 2004. Partial rootzone drying: regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel). *Functional Plant Biology* 30: 653-662.
- Xu, H.L., Gauthier, L. and Gosselin, A. 1995. Effects of fertigation management on growth and photosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT. *Scientia Horticulturae* 63:11-20.
- Xu, H.L. 2007. Xerophytophysiology in crop production. In: Xu, H.L. (Ed.), *Dryland Crop Production - Technology Breakthroughs and Study Cases*. Research Signpost, Kerala (India). pp. 37-54.
- Xu, H.L., Qin, F.F., Wang, F.H., Xu, Q.C., Wang, R., Shah, S.K., Zhao, A.H. and Li, F.M. 2009. Applications of xerophytophysiology in plant production - Partial root drying improves tomato crops. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7(3&4):981-988.
- Xu, H.L., Qin, F.F., Wang, J.S., Xu, R.Y., Wang, M.L. and Morita, S. 2009. Applications of xerophytophysiology in plant production - Peanut cultivation with the AnM method. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7(2): 565-570.
- Xu, H.L., Qin, F.F., Xu, Q.C., Tan, J.Y. and Liu, G.M. 2011. Applications of xerophytophysiology in plant production - The potato crop improved by partial root zone drying of early season but not whole season. *Scientia Horticulturae* 129:528-534.
- Xu, H.L., Xu, Q.C., Li, F.L., Feng, Y.Z., Qin, F.F. and Fang, W. 2012a. Applications of xerophytophysiology in plant production-LED blue light as a stimulus improved the tomato crop. *Scientia Horticulturae* 148:190-196.
- Xu, H.L., Qin, F.F., Xu, Q.C., Li, J.M., Ma, M. and Shah, R.P. 2012b. Improvements in disease resistance and fruit quality of organic tomato intercropped with living mulch of turfgrass. *Journal of Food, Agriculture and Environment* Vol.10 (2): 593-597.



別表 本報告に使用されている記号およびその定義と意義

記号	単位	定義	シグナル伝達と早生生理学の応用における意義
P_N	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	ある光強度下の見かけ上光合成速度	P_N は、最初、光 (PPF) の増加にほぼ直線的に増加するが、最大値のほぼ 63% になると曲線になり始める。
P_C	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	光合成キャパシティ	P_C は光—光合成曲線の漸近線で、光去度の増加に伴う光合成速度の最大値で植物の光合成能力を評価する指標とする。
R_D	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	暗呼吸	暗呼吸は軽い水欠乏に刺激され増加するが、重いストレスに抑制される。
K	$\text{m}^2 \text{s mmol}^{-1}$	定数	光合成曲線の中の定数で、高くなると曲線の湾曲程度が高い。
Y_Q	mol mol^{-1}	最大光量子利用効率	光量子利用効率は $Y_Q = K P_C$ で計算される。早生生理調整によって高くなる。
Ψ	MPa	葉の水ポテンシャル	Ψ は水欠乏によって低下するが、処理は軽い場合あるいは部分または瞬時的な処理の場合に低下は小さい。
Ψ_{FT}	MPa	水飽和の時の Ψ	Ψ_{FT} は π_{FT} の低下に伴って少し低下するかもしれないがほとんどの場合は変わらない。従って π_{FT} の低下によって膨圧が維持される。
Ψ_{MD}	MPa	昼時の水ポテンシャル	昼に蒸散蒸発量が大い場合、 Ψ_{MD} は低下するが、低下程度は π_{MD} ほどではないなら、膨圧が維持される。
π	MPa	葉の浸透ポテンシャル	水欠乏の時 π は低下するが、水欠乏しない時、浸透調整が起るならば π も低下する。能動的な溶質増加によるもので欲しいものである。
π_{FT}	MPa	水飽和の時の π	P_{FT} が浸透調整によって低下する場合、 Y_{FT} は低下しないから、 P_{FT} は高くなる。溶質の能動的増加がないと、 P_{FT} は変わらない。
π_{IP}	MPa	細胞質と細胞壁と分離しようとする時の π	π_{IP} は対照区より低いならストレス耐性が高くなったことを意味している。
π_{s+a}	MPa	水飽和のときに細胞共質原形質を異質水で希釈した後の葉の π	π_{s+a} は水飽和のときに細胞共質原形質を異質水で希釈した後の葉の π 、すなわち、水分が飽和する時一枚の葉身全体の π 。この項目は P-V 曲線に定数として使い、指標として使っていない。
P_{MD}	MPa	昼時の浸透ポテンシャル	昼に蒸散蒸発量が大い時 Ψ_{MD} は低下すると、 π_{MD} も低下するが、浸透調整が起こった場合、低下程度は前者より後者が小さく膨圧が維持される。
δ	MPa	P-V 曲線の中にゼロ膨圧点に近く曲線と直線に挟まれる差の半値	P-V 曲線を解析する時ゼロ膨圧点を定めるため使う定数。細胞質と細胞壁と分離しようとする時の浸透ポテンシャル (π_{IP}) および相対含水率 (ζ_{IP}) はこの点で決める: (y, x), つまり [(y ⁻¹) _{IP} , (1- ζ) _{IP}]。
P	MPa	葉の膨圧あるいは圧ポテンシャル	P は Ψ と π 差で、 π が大きく低下すると Y が小さく低下する場合、 P が維持される。
P_{FT}	MPa	水飽和の膨圧	π_{FT} は大きく低下して Ψ_{FT} は小さく低下するなら P_{FT} がより高くなる。このように浸透調整の程度がわかる。
P_{MD}	MPa	昼時の膨圧	π_{MD} は大きく低下して Ψ_{MD} は小さく低下するなら π_{MD} が維持される。これは浸透調整の生理的な役割といえる。
ζ		葉の相対含水率	葉の相対含水率、最大値は 1 とする。(1- ζ) は相対水欠乏で P-V 曲線の中に横軸の自変数とする。
ζ_O		理論上水飽和の時の相対含水率	理論的な数値は 1 とするので、変化しない。
ζ_{FT}		水飽和時、相対含水率の実測値	Ψ_{FT} と対応する時の相対含水率で実際に 1 までにならない。
ζ_{IP}		細胞質と細胞壁と分離しようとする時の相対含水率	細胞質と細胞壁と分離しようとする時の葉の相対含水率で対照区より低いならストレス耐性が高く、一層水欠乏に耐えることを意味している。
1- ζ		相対水欠乏	P-V 曲線の中に横軸の自変数とする。
ζ_{sym}		細胞原形質内の水割合	細胞原型質の割合で、浸透調整に伴って大きくなる。ほとんどの生化学反応は原形質内で起こるので、 ζ_{sym} が高くなると植物に有利になる。
ζ_{apo}		細胞壁および空間 (アポプラスト) にある水の割合	浸透調整が起こると ζ_{apo} は小さくなる。水がより重要な原形質に集まるため植物に有利となる。
C_{FT}	osmol m^{-3}	水飽和の時の溶質の絶対浸透濃度	C_{FT} は浸透調整によって増加する。
C_S	osmol m^{-3}	原形質内の溶質の絶対浸透濃度	C_S は浸透調整によって増加する。
ΔC_{osm}	osmol m^{-3}	溶質絶対濃度の比較差異	ΔC_{osm} は浸透調整による溶質の増加量で、浸透調整能力を測る指標である。
α		定数	P-V 曲線の定数で、 α が大きい場合、曲線の湾曲が大きい。
β		定数	P-V 曲線の後半の勾配の変動を示す定数である。
O_2^-		超酸化物	超酸化物 (superoxide) は、化学式が O_2^- で表されるスーパーオキシドアニオンを含む化学物質の総称で、自然界で酸素ガス (O_2) の一電子還元により生成され、1 つの不対電子を持つ。スーパーオキシドアニオンは、二酸素と同様にフリーラジカルで、一般に活性酸素と呼ばれる。植物に危機刺激を与えると、シグナル物質として O_2^- が増える。適応調整が起こると O_2^- は抗酸化酵素の SOD に分解される。
SOD		スーパーオキシドディスムターゼ (Superoxide dismutase)	SOD は細胞内に発生する活性酸素を分解する酵素である。生物体内に防御システムとして活躍し、障害、老化と衰弱の原因になる活性酸素を除去することで、健康維持に役立っている。植物では危機刺激を与えると適応調整の 1 つは SOD 活性が増えることである。
POD		ペルオキシダーゼ (Peroxidase)	POD は過酸化水素を基質とするものが多いが、過酸化脂質など有機過酸化物に対する活性が強いものもある。 O_2^- は、まず SOD によって過酸化水素に変換され、POD によって無害な水に分解される。植物ではストレス耐性と病原菌の感染防御に関与している。植物では軽い危機刺激を与える場合は POD の活性化をあまり誘発しない。
CAT		カタラーゼ (catalase)	CAT は過酸化水素を酸素と水に変える反応を触媒する酵素で、植物で葉緑体に多く含まれる。過酸化水素は、細胞にとって有害な物質で細胞に傷をつける。好気呼吸をする生物は過酸化水素が細胞内で生成しやすいので、カタラーゼは細胞を護っている。植物では軽い危機刺激を与える場合は CAT の活性化をあまり誘発しない。
MDA		マロンジアルデヒド (malondialdehyde)	MDA は生体内で自然に発生し酸化ストレスの指標になっている。重いストレスではなく軽い危機刺激の場合 MDA 濃度はあまり増えない。危機刺激による適応調整が発生すると一旦増えた MDA 濃度は元に戻る。
Pro		プロリン (proline)	プロリンはタンパク質を構成するアミノ酸は通常一級アミンであるが、唯一環状の二級アミンである。プロリンは植物の環境ストレスに対する植物体内の指標の一つとして知られている。
PCR		ポリメラーゼ連鎖反応 (polymerase chain reaction)	PCR は DNA を増幅するための原理で、それを用いた手法を指す場合は PCR 法と呼ぶ。PCR 法から派生する逆転写ポリメラーゼ連鎖反応、リアルタイム PCR や DNA シークエンシング等の様々な技術は分子生物学に広く応用されている。また、微量のゲノムや RNA から目的の DNA を選択的に増幅できることから、DNA 型鑑定や診断等にも応用されている。シグナル伝達と早生生理学の応用に関する研究では、植物に危機刺激を与えると該当する遺伝子の活性化ができるかどうか PCR 法で確認できる。
Primer		プライマー	プライマー は DNA ポリメラーゼを用い DNA を合成する時に 3'OH を供給する役割をもつ短い核酸の断片である。リアルタイム PCR 技術を効率的に行うため反応性の良いプライマーを設計することが重要である。