

# 植物の潜在力と、それを引き出す草生栽培

～自然農法交配種トマト「妙紅」の栽培試験結果を例に～

大久保 慎二

## 植物は環境に柔軟に対応できる

暑い、乾燥している、食べ物（養分）がない、襲われそう・・・環境にこういったストレスがあつた場合、私たちのような動物はその場から動いて逃げるができます。しかし植物は、枝葉や根を多少伸ばす程度しか動くことができません。種子の形であれば子孫は動かさずし、浮草のような例外もありますが、植物は発根発芽後の環境の悪化に対し、基本的に「耐える」しかないのです。

そこで植物はさまざまな環境変化に耐えるためにいろいろな選択肢を遺伝子の形で持っています。そして、環境ストレスにに応じて、その機能をどのくらい使うかを決めているのです。この現象は、分かりやすく「遺伝子のON/OFF」といった2極の表現で紹介されることもあります。植物全体から見た遺伝子による機能の発現は「高くなるか、低くなるか」という「程度」で理解するべきことです。

当センター農業試験場で育成された交配種の大玉トマト「妙紅」を、4種類の区画（①草生+敷草区、②草生+敷草なし区、③草生なし+敷草区、④草生敷草なし区）で栽培して、病害や乾燥ストレスなどに抵抗する遺伝子の発現程度を調べたところ、草生栽培の2区でその活性がかなり高まること分かりました（図1・成果1）。ここでの草生栽培は、条間に5種類のイネ科牧草を混播しています。

そして、草生栽培によって実際に病虫害が減って品質が高まり、さらに敷草と組み合わせることで収量が向上することも分かりました（成果2）。草生栽培にはさまざまな効果がありますが、草生によって作物が刺激され、さまざまな遺伝子の機能が高まったことも、この結果に大きく影響していると考えられます。

## 植物の持つさまざまな抵抗性

植物が病虫害などのストレスに対して抵抗する仕組みは、現代ではかなり解明されてきています。

抵抗性には静的なものと動的なものがあります。「静的抵抗性」は、植物が病虫害などのストレスと遭遇する前から持っている抵抗性のことで、植物や品種の特性としての元々持っている抗菌物質や細胞壁の厚さ・硬さなどが該当します。「動的抵抗性」は、病虫害ストレスなどに反応して新たに身につけていく抵抗性のことで、遺伝的抵抗性や生育環境で変わる抗菌物質の量、細胞の形質などが該当します。先に紹介した草生栽培により高まった各種遺伝子活性による抵抗性は動的なものといえます。

遺伝的抵抗性はさらに「真性抵抗性」と「圃場抵抗性」に分けられます。真性抵抗性は単一またはごく少数の遺伝子によって決まるもので、強力かつ環境変化に対して安定的に働きます。この遺伝子はほぼ優性遺伝するため、真性抵抗性のある植物を片親に交配すれば、新たな抵抗性品種を作ることができます。しかし病原菌の変異（レース分化）によって打破されやすいという欠点もあります。これはヒ



① LMR 区 草生あり・敷草あり



② LM 区 草生あり・敷草なし



③ NR 区 草生なし・敷草あり



④ N 区 草生なし・敷草なし



図1 成果1・2・3の試験設計

各区写真の左が処理の様子、右が生育の様子。トマト品種は「妙紅」、草生はイネ科牧草を5種類混播。8反復。草生は生鮮重で120g/m<sup>2</sup>程度になるよう適宜刈り敷き、③NR区の敷草は②LM区のものを用いた。

処理区	LMR 区 草生あり 敷草あり	LM 区 草生あり 敷草なし	NR 区 草生なし 敷草あり	N 区 草生なし 敷草なし
収量 (g/株)	<b>2,910</b>	2,555	<b>3,062</b>	2,995
ビタミンC(mg/L)	<b>321</b>	<b>318</b>	296	297
硝酸 (mg/L)	10.7	9.6	<b>11.1</b>	<b>11.4</b>
糖 (%)	<b>6.2</b>	<b>6.1</b>	5.9	5.9
輪紋病罹病率(%)	12.0	13.5	<b>19.4</b>	<b>23.8</b>
アブラムシ(匹/葉)	1.0	1.0	<b>7.9</b>	<b>6.9</b>
タバコガ被害率(%)	6.5	5.8	<b>10.3</b>	<b>11.7</b>

収量：敷草をした区（LMR区・NR区）で高まりました。  
 病害害：草生区（LMR区・LM区）で軽減しました。  
 品質：草生区（LMR区・LM区）で高まりました。

成果2 草生栽培によるトマトの耐病性と果実品質の改善効果  
 （要約版・植物土壌診断チーム）

遺伝子の特徴	略称	発現程度(N区比、葉/根)		
		LMR 区	LM 区	NR 区
全身獲得抵抗性の発現の指標となるタンパク質	PR1	+ / ns	+ / ns	ns / ns
	NIM1	ns / +	ns / +	ns / ns
サリチル酸前駆体を合成する酵素	ICS	ns / +	ns / +	ns / ns
	PAL	+ / ns	+ / ns	ns / ns
エチレン応答性転写因子	ERF3	ns / +	ns / ns	ns / ns
乾燥・低温ストレス等の緩和に関する転写因子	DREB1	+ / +	+ / +	ns / ns
	DREB2	ns / +	ns / +	ns / +
	DREB3	+ / ns	+ / ns	ns / ns
PRタンパク質に関わる転写因子	Pti4	+ / ns	+ / ns	ns / ns
	Pti5	ns / +	ns / +	ns / ns
	Pti6	+ / ns	+ / ns	ns / ns
硝酸還元酵素	NR	+ / ns	+ / ns	ns / ns

+：遺伝子の発現を促進 -：発現を抑制 ns.：発現傾向なし

成果1 草生栽培はトマトのストレス耐性に関する多数の遺伝子群の発現を促進する  
 （要約版・植物土壌診断チーム）

この医療現場でも起きてい  
 る、薬剤と薬剤耐性菌のイタ  
 チごっこの関係に似ていて、  
 いくつかは病原菌・耐性菌側が  
 勝利するのではないかという  
 見方もあります。少し話は変  
 わりますが、農水省が都道府  
 県からの報告を基にまとめた  
 2016年度の「薬剤抵抗性  
 病害虫の発生状況等調査」で  
 は、薬剤抵抗性の発生件数は  
 殺虫剤、殺菌剤、除草剤を合  
 わせ1285件にも上ってい  
 る状況です（日本農業新聞、  
 2017/2/26）。真性  
 抵抗性も徐々に打破されてい  
 くのではないかと考えます。  
 これに対して、複数の遺伝  
 子によって決められるのが圃  
 場抵抗性です。その効果は緩  
 やかで、環境の影響を受けや  
 すいものが多いといわれてい  
 ます。しかし病原菌の変異に  
 対して強いという特徴があ  
 り、どちらも一長一短です。  
 なお、草生栽培で高まるのは  
 基本的に圃場抵抗性とと考え  
 られます。  
 植物は一度病原菌に感染す  
 ると、次の感染に備えて全身  
 で耐性機構を発動するという

※平成28年度の研究成果は、他にもさまざまあります。詳しくはウェブサイト <http://www.infr.or.jp> でご確認ください。

仕組みも持っています。例えば、植物の葉は病原菌に侵された部位の周りを自ら枯死させることでその拡大を防ぐとともに、植物ホルモンの一種であるサリチル酸を合成し、全身に巡らせます。すると、そのサリチル酸がシグナル物質として働き、全身に抵抗性が生じるのです。これを「全身獲得抵抗性(SAR)」といいます。これは、はじめに感染した病原体以外にも抵抗性を発揮するのが特徴です。同じように根が刺激されることで地上部にも抵抗性が生じる「誘導全身抵抗性(ISR)」などもあります。

## 植物のジレンマ

サリチル酸は病原菌(寄生菌)のストレスによって増えて抵抗性を生じさせる植物ホルモンですが、同じような植物ホルモンは他にもあります。例えば、乾燥や塩害などの環境ストレスにはアブシジン酸、虫害や腐生菌のストレスではジャスモン酸が増え、それぞれシグナル物質として働くことで動的に抵抗性が生じます。

では、これらの植物ホルモンがどんどん生成されればさまざま

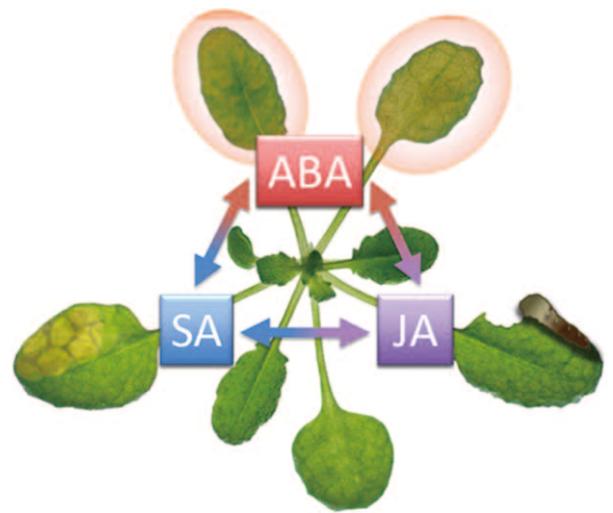


図2 ストレスに対する植物ホルモンシグナルのネットワーク(理化学研究所, 2008より)  
乾燥、低温、塩害などに応答するアブシジン酸(ABA)、寄生病害に応答するサリチル酸(SA)、虫害や腐生病害に応答するジャスモン酸(JA)による防御機構は、拮抗関係にある

な抵抗性が増えていい結果になるか?というところ、そう単純にはいきません。ある研究成果(理化学研究所, 2008)によると、アブシジン酸(ABA)、サリチル酸(SA)、ジャスモン酸(JA)による防御機構は拮抗関係、つまり全ての抵抗性を一度に十分に引き出すことはできない、「あちらを立てればこちらが立たず」の関係にあるというのです(図2)。例えば、乾燥などのストレスが強い場合に植物はアブシジン酸を増やして防御機構を働かせますが、それによつてサリチル酸による病害抵抗性の

発現は弱められてしまうのです(Yasudaほか, 2008)。植物が緊急を要するストレスに対して優先的に対応するための仕組みと考えられています。

さらに、これらのストレスへの対応機構と、生長に関する機構も拮抗関係にあります。つまり、ストレスへの対応を優先させれば生長量(収量)が減るといふ「植物のジレンマ」があるのです(Herns and Matson, 1992)。植物体内の生理反応だけで、各種ストレスへの対応と生長量の確保は両立し難いということです。

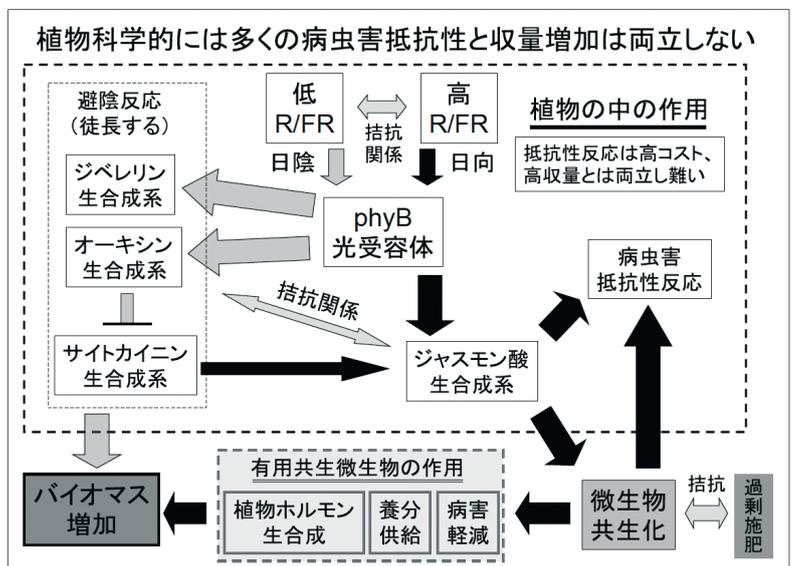


図3 有用微生物の共生化の生態的意義(概念図・池田ほか 2013より)

植物は日向ではR/FR(赤色/遠赤色)比の高い光を受けてジャスモン酸を介した病虫害抵抗性にエネルギーコストを投資する。一方、日陰ではR/FR比の低い光を受けて細胞分裂や細胞増殖に関する植物ホルモンを生産し、光を求めて徒長する。ジャスモン酸の合成系(右側)と、細胞分裂や細胞増殖に関する植物ホルモンの合成系(左側)は拮抗関係にあり、植物体内では両方の植物ホルモン合成系が同時に大きく活性化されることはない。一方、多くの共生微生物は細胞分裂や細胞増殖に関する植物ホルモンを生合成する能力を有しているため、植物は共生微生物由来の植物ホルモンを受け取ることで、抵抗性と生長を両立することが可能になると考えられる。

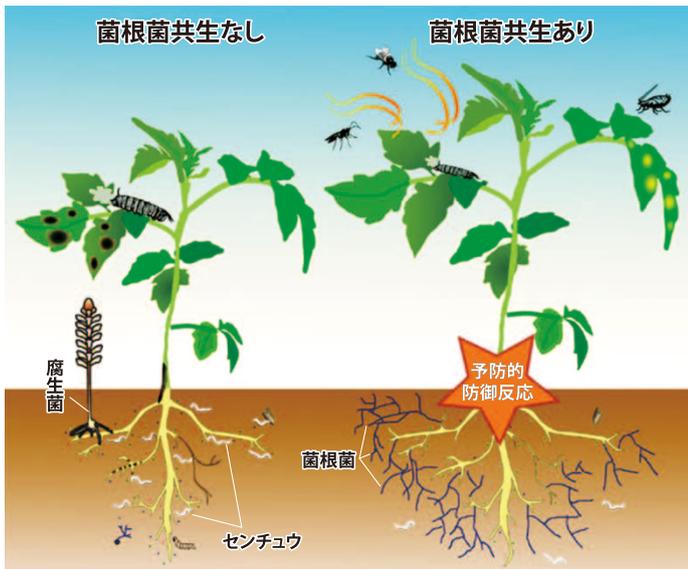


図4 アーバスキュラー菌根菌との共生なし（左）と共生あり（右）の病害虫への反応の違い (Jung ほか, 2014 を一部改変)

菌根菌の共生がない場合、腐生菌への耐性は高いが、植食者（害虫）への耐性が低い。そして根から菌根菌の菌糸分岐を誘導するストリゴラクトンを出し、共生の開始が促進される。菌根菌と共生していると、菌根菌により各種養分の吸収効率が向上するため生長が促進される。また根の浸出液の組成が変わり、センチュウを寄せ付けず、根圏微生物叢は良い方向に変わる。この予防的防御反応は、土壌病原菌やセンチュウ、植食者の発生率や被害を軽減する。地上部もまたジャスモン酸によって制御される防御機構により植食者と腐生菌の両方の侵入を防ぐようになり、揮発性物質の増加により天敵の誘引も加速される。

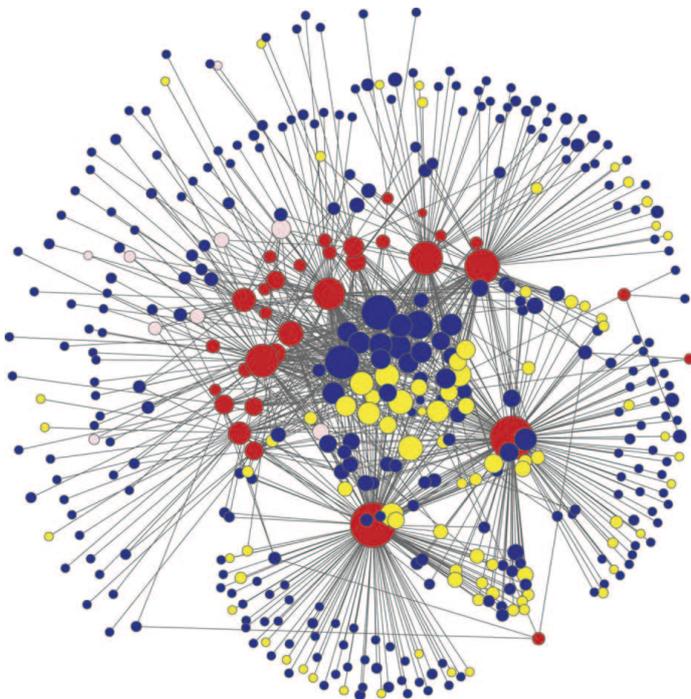


図5 森林における植物と真菌類のネットワーク (Toju ほか, 2014 より)  
 ●植物種 (33 種)、●外生菌根菌、●アーバスキュラー菌根菌、●機能不明菌  
 線は共生関係、円のサイズは共生する菌または植物の数を表す

## ジレンマを乗り越える可能性を秘めた微生物との共生

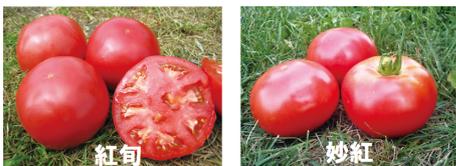
しかし、有用な微生物との共生によりこのジレンマを克服できる可能性があります（池田ほか、2013・図3）。抵抗性の獲得、各種ホルモンの合成、養分の吸収などを、共生微生物の力を借りることで補えるというのです。そして、有用微生物との共生は過剰施肥によって減少することも分かっています。

共生微生物もさまざまな種類がいりますが、有名なものとしてアーバスキュラー菌根菌（AM菌・昔の呼び名はVA菌根菌）があります。この菌根菌は植物のリンや水等の吸収を促進することで有名ですが、さらに病害虫に対する抵抗性を誘発させる働き(MIR)もあります(Jung ほか、2014)。そしてそれによって生じる抵抗性は病虫害に対して対処ではなく予防的に働くため、作物栽培に有益と考えられています(図4)。

自然界では、植物はさまざまな微生物と共生しているといわれています。例えば、これは森林の研究ですが、DNAバーコーディングという手法を用い、どの植物とどの真菌類が共生しているかを調べた事例があります。結果、さまざまな機能をもった真菌類が植物と共生し、またそれは複雑なネットワークとしてつながり、植物種間で共有されていることがわかりました(Toju ほか、2014・図5)。

こういった研究は畑での草生栽培や間作・混作においては進んでいませんが、さまざまな微生物と共生することで多様な効果を得て、結果的に病虫害抵抗性と収量増加を両立させる仕組みがあるのではと期待されています。実際、5種類のイネ科牧草によるトマトの草生栽培ではアーバスキュラー菌根が増え、被害が少ない傾向もみられています(次ページ成果3)。

自農交配トマト「**紅旬**」および「**妙紅**」と市販品種「桃太郎8」を簡易雨よけ草生環境下で比較栽培したところ、両品種とも可販量は市販品種を上回り、食味も優れていました

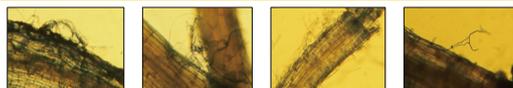


	紅旬	妙紅
可販量比 桃太郎8を100	126	120

食味官能試験においても自農交配の2品種は「桃太郎8」より良食味との評価でした

成果4 自然農法による簡易雨よけ草生栽培において「紅旬」「妙紅」は「桃太郎8」より高収量(要約版・生態系制御チーム)

写真紺色部分が菌根菌



処理区	LMR区 草生あり 敷草あり	LM区 草生あり 敷草なし	NR区 草生なし 敷草あり	N区 草生なし 敷草なし
菌根菌の着生	極めて多い	多い	少ない	極めて少ない
輪紋病の発生	12%	14%	20%	23%

菌根菌の着生率は草生区で高まり、敷草をすることでさらに高まりました。菌根菌の着生率が高い処理区は輪紋病の発生も軽減していました。

成果3 草生栽培におけるトマト根の菌根菌共生(要約版・植物土壌診断チーム)

## 全てを両立させる可能性のある自然農法育成品種+草生栽培

草生栽培と組み合わせるには、草生栽培環境下で選抜育成された自然農法育成品種が適している可能性も示唆されました。成果1で紹介したさまざまな遺伝子機能の発現程度について、市販交配種「桃太郎8」でも調べたところ、草生栽培による発現量の変化は自然農法交配種「妙紅」ほど顕著ではありませんでした。また別の草生栽培環境下における比較試験では、自然農法交配大玉トマト「妙紅」と「紅旬」は、「桃太郎8」より高収量という結果も出ています(成果4)。

この違いが何に起因するかは今後の研究課題ですが、品種の育種方法に由来するのではないかと考えています。ほぼ全ての自然農法育成品種は草生栽培環境下で選抜・育成されてきました。作物には適度に競争刺激があり、ちよつと我慢する環境においてさまざまな機能を発現させると考え、またその活用こそが自然農法の一つの理想形と考えたのです。そして草生栽培の結果として各種競合ストレスによりさまざまな遺伝子が活性化されたでしょうし、少肥環境にもなることで菌根菌などさまざまな共生微生物が増え、植物とのネットワークも構築されることで、さまざまな利益が得られていたと

考えられます。

自然農法育成品種は、そういった環境下でよりよい応答をして良好な生育をしたものが選抜され商品化されてきた可能性ががあります。もちろん、これらの種子は市販前に草生栽培ではない環境下でも他の品種より有力なことを確認した上で販売していますが、草生栽培でより力を発揮するのかもしれない。

草生栽培には、他にもさまざまな機能があります。天敵や菌根菌をはじめとした多様な生きものを育んだり、養分の溶脱を防いだり、団粒や腐植を増やしたり、根で土を耕したりしてくれます。それを刈り敷く草マルチも生きもののエサや棲み家となりますし、最近では刈って野ざらしにした野草から病原菌を抑える拮抗菌の放線菌とバチルス属菌が大量に見つかり(日本農業新聞、2017/2/5)、草マルチの役割も見直されてきています。

草生帯に必要な面積は無駄に思え経営的には損と感じるかもしれませんが、自然の力を引き出す選択肢の一つとしては非常に有力で、こういった効果も含めた総体として、栽培がよりうまくいくようバランスを調えるのが自然農法であるともいえます。

### 参考文献

- 1) 日本農業新聞 (2017/2/26)「薬剤抵抗性」広がる イチゴ殺ダニ、いもち・・・病害虫発生報告 3年で2倍に 16年度農水省調査。
- 2) 理化学研究所 (2008) 植物の耐病性の複雑な制御メカニズムを解明 - 病原菌と環境ストレスに対抗する複雑な生存戦略が存在 - 報道発表資料。
- 3) Yasuda M, Ishikawa A, Jikumaru Y, Seki M, Umezawa T, Asami T, Maruyama-Nakashita A, Kudo T, Shinozaki K, Yoshida S, Nakashita H (2008) Antagonistic interaction between systemic acquired resistance and the abscisic acid-mediated abiotic stress response in Arabidopsis. Plant Cell. 20(6):1678-1692.
- 4) Herms DA, Mattson WJ (1992) The dilemma of plants: to grow or defend. The Quarterly Review of Biology. 67(3):283-335.
- 5) 池田成志, 鶴丸博人, 大久保卓, 岡崎和之, 南澤究 (2013) 植物共生科学の新展開と農学研究におけるパラダイムシフト. 化学と生物 51(7):462-470.
- 6) Jung SC, Martinez-Medina A, Lopez-Raez JA, Pozo MJ (2012) Mycorrhiza-induced resistance and priming of plant defenses. Journal of Chemical Ecology. 38(6):651-64.
- 7) Toju H, Guimaraes PR Jr, Olesen JM, Thompson JN (2014) Assembly of complex plant-fungus networks. Nature Communications. 5:5273.
- 8) 日本農業新聞 (2017/2/5) 野草から拮抗菌大量に 病害抑制利用を促進 世界農業遺産の熊本・阿蘇。