

# ミネラルと野菜と人間の 不思議な関係

東京農業大学 客員教授 渡辺 和彦

写真1 亜硫酸ガスの気孔からの吸収と同化

(浅川富美雪と実験、渡辺和彦 原図)



注: <sup>35</sup>Sで標識した亜硫酸ガス(SO<sub>2</sub>)のトマト葉への処理。白い所が<sup>35</sup>Sが存在する部位。処理直後では葉脈は黒く<sup>35</sup>Sはほとんど入っていないが、7日後は葉脈や茎も白くなり、<sup>35</sup>Sは明らかに同化され転流している。

亜硫酸ガスも植物に  
吸収利用される

植物は二酸化炭素を葉の気孔から  
吸収するように、アンモニアガスや  
亜硝酸ガス、亜硫酸ガスも気孔から  
吸収し、速やかに同化します。筆者



## 第6章 葉面からの吸収

### 植物における葉面吸収

モイオウの放射性同位元素を用い、  
亜硫酸ガスがトマトの葉から吸収さ  
れ、体内に転流利用されることを確  
認しました(写真1)。もちろん、高  
濃度ではガス障害を生じます。

マーシユナーによると、家畜ふん  
尿を散布した牧草地では牧草の全窒  
素吸収量のうち10〜20%はアンモニ  
アガスの形で同化されているとの研  
究や、イオウ欠乏地帯では植物の全  
吸収イオウの約半分は大気からの亜  
硫酸ガス由来のイオウによるとの研  
究もあります。イギリスでは大気汚  
染が減り、イオウ欠乏地帯のコムギ  
では、タンパク質中のイオウ含量の  
低下によって製パン時の膨張率が低  
下したとの報告もあります。

### 葉裏からの吸収が多い



葉の表面はクチクラ層に覆われ、  
そのワックスは外部からの水の侵入

第1表 葉の部位によるリン酸の吸収移行分布率  
の比較 (渡辺和彦・1989)

塗布部位 (第3葉)	葉緑 R % (分布%)	葉裏 R % (分布%)	葉表 R % (分布%)
R 添加葉	99.295	98.691	99.932
その葉軸	0.270 ( 38.3)	0.154 ( 11.8)	0.014 ( 20.7)
先端葉	0.024 ( 3.5)	0.119 ( 9.1)	0.005 ( 8.0)
上位葉	0.052 ( 7.3)	0.118 ( 9.0)	0.002 ( 3.7)
下位葉	0.006 ( 0.8)	0.009 ( 0.7)	0.000 ( 0.0)
茎	0.163 ( 23.2)	0.303 ( 23.1)	0.018 ( 27.0)
根	0.190 ( 27.0)	0.606 ( 46.3)	0.028 ( 40.8)
移行率	0.71	1.31	0.07

塗布部位	先端葉裏	第2葉裏	第3葉裏	下位葉裏	茎
移行率	1.68	2.30	1.31	0.20	1.71

注: トマト幼植物に放射性同位元素(R)で標識した無機リン酸を用いた実験。葉裏、葉表は葉縁部分を除いた部分に筆で塗布。測定は5日後。

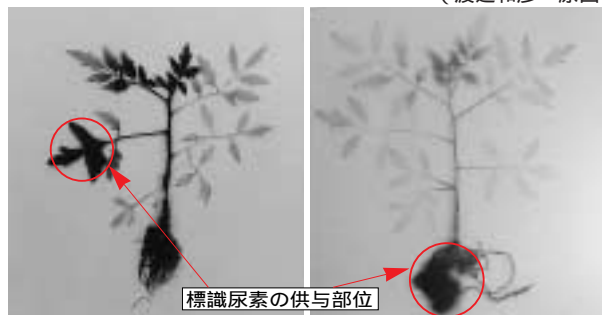
### 尿素の葉面散布で コムギのタンパク 収量向上



葉面散布で最も吸収利用されやす  
い肥料は尿素ですが、尿素分子の直

や葉内からの水の蒸散を抑制してい  
ますが、そこには親水性の直径1 nm  
以下の孔があります。この孔はエク  
トデスマータと呼ばれる葉裏に多いの  
ですが、葉面に散布されたリンの大  
半はこの孔から植物体内に侵入しま  
す。また、第1表に示すように、葉  
の表面よりも裏面から吸収されやす  
いことが分かります。葉縁部の水孔  
も吸収能力があります。

写真2 尿素の葉からと根からの吸収分布状態(3日後)  
(渡辺和彦 原図)



注: 放射性同位元素<sup>14</sup>Cで標識した尿素を、左は葉から、右は根から与えて3日後の分布。葉から与えた尿素は、新葉だけでなく、根にもよく転流している。

径は0・88nmと小さく、イオン化していないため吸収されやすいのである。写真2に示すように、葉面からの尿素は根にもすぐに転流されます。尿素の葉面散布により根からのアミノ酸分泌が増加し、微生物相が変わるとの研究もあります。

尿素の葉面散布については、1950年代に各種作物で広く研究されています。近年では北海道の佐藤仁らがパン用コムギ「キタノカオリ」で、埼玉の佐藤一弘らは「農林61号」で、2%の尿素(N・9200ppm)の葉面散布がタンパク質含有率の向上とともに収量増になるとの技術を確認しています。北海道では開花期

第2表 尿素・エテホン混液の出穂始期葉面散布の効果

処理区	精子実重 (kg/10a)	指数	稈長 (cm)	子実粗 タンパク (%)	成熟期 標肥を0と する日差	倒伏程度 無・甚 4段階
無窒素	240	47	70	7.69	-1	無
6-0-0	450	88	84	7.67	0	無
8-0-0	510	100	88	8.64	0	無
8-2-0(標肥)	570	112	90	9.40	0	無
8-0-1.5	580	114	91	9.70	+3	中
8-0-1.5 (エテホン入り)	580	114	83	9.50	+1	無
8-2-1.5	688	135	92	9.90	+4	多
8-2-1.5 (エテホン入り)	638	125	83	10.56	+1	無

注: 1997~1998年、埼玉農試圃場での佐藤一弘らの試験結果。

施肥時期: 元肥 - 6葉期 - 出穂始期 kg/10a

出穂始期追肥は、いずれも尿素による葉面散布。

(エテホン: 10% 2-クロロエチルスルホン酸液。植物に散布すると分解してエチレンを発生する植物成長調整剤)

以降2、3回の散布が推奨されています。

ここでは、倒伏防止と熟期促進のため、エテホン500倍液を混用し、出穂始期に160ℓ散布すると効果が高いという埼玉の試験結果を第2表に示します。佐藤一弘によると、現場ではメタン発酵消化液の葉面施用が有機認証も受けられることで、現在普及しつつあるそうです。

メタン発酵消化液はアンモニア態窒素を約2000ppm含み、そのままコムギに散布できます。出穂始期追肥の標準施肥量は10a当たり窒素2kg

写真4 トマトのしり腐れ  
(渡辺和彦 原図)



注: 糖度を高めるために水をきると、発生する。農家は小さいうちに摘果するが、熟したしり腐れ果は、食べると普通においしい。

果樹のカルシウム欠乏障害、リンゴのビターピットなどでは0・3~0・5%の塩化カルシウム液(Ca・1083~1806ppm)の幼果期からの果面散布が、障害発生低減効果

## カルシウム欠乏対策



です。10a当たりではメタン発酵消化液は約1tの施用になり、写真3に示すような散布機材も開発されています。

写真3 メタン発酵消化液の試作散布機 (佐藤一弘 原図)



写真5 ハクサイの心腐れ症状 (渡辺和彦 原図)



注: 生育初期の窒素過多、水不足で発生しやすい。カルシウムの葉面散布効果は出にくい。

があることは世界的にも認められています。果実のカルシウム含有率の増加は収穫後の腐敗防止にも効果があるため、リンゴ栽培農家にとってカルシウムの果面散布は実用技術としても広く普及しています。ところが、野菜であるトマトのしり腐れ(写真4)やハクサイの心腐れ(写真5)などでは、カルシウムの葉面散布効果は認められにくい事例となっています。

ソラメしみ症の事例

トマトやハクサイではカルシウムの葉面散布効果が認められにくいものの、鹿児島県で問題になっている



写真6 ソラマメのしみ症

(池田健一郎 原図)



写真7 カルシウムとリンの葉からの転流状況の比較

(渡辺和彦 原図)



写真8 葉柄基部から与えたカルシウム(上)とリン(下)の分布

(佐藤毅ら 原図)



注: いずれもマイクロピペットで標識された溶液を10 $\mu$ L添加し、3日後のオートラジオグラム。カルシウムでは添加した部位から上位葉によく転流している。リンは地上部にも根にも転流しているが量は少ない。

ソラマメのしみ症(写真6)では、池田健一郎、久米隆志はじめ多くの方々の長期にわたる試験により、明確な葉面散布効果が出ています。しみ症はソラマメの種皮の組織が壊死し、白色から後に褐変する障害で、外観からは判別できません。主に8月下旬〜9月上旬定植の夏まき作型で、年内に収穫する下節位の莢に発生が多く、カルシウム不足はむしろ、カリウム過剰も障害発生を助長することが水耕栽培で明らかになっています。

1991〜1994年の試験では、0・3%塩化カルシウムの1週間おきに7回の葉面散布は、4年間ともしみ症発生を大幅に防止できています。同時に試験した10a当たり70kgの塩化カルシウムを4回に分けての土壌灌注も、同様の効果を認めています。

トマトのカルシウム転流  
筆者は放射性同位元素である<sup>45</sup>Caで標識した塩化カルシウムを用いてトマトの幼果期のカルシウム果面散布で、しり腐れ予防効果を確認していた池田英男や大塚化学株式会社

マトでのカルシウム転流状態を調べましたが、カルシウムを葉に与えた場合、ほかの葉にはほとんど移行しません(写真7)。すなわち、カルシウムは篩管を転流しにくいことを示しています。したがって、カルシウムの葉面散布効果がにくいのは、一つには葉に与えたカルシウムはほとんどほかの部位に転流しないため、ということがいえます。

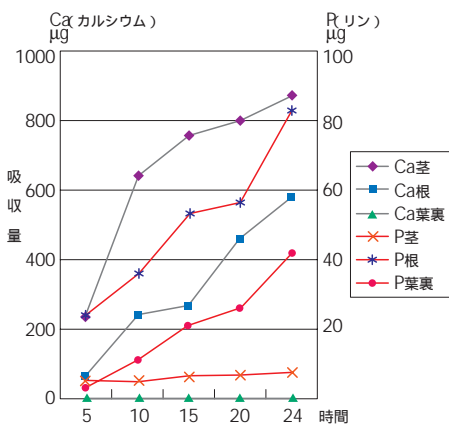
トマトの幼果期のカルシウム果面散布で、しり腐れ予防効果を確認していた池田英男や大塚化学株式会社

そこで、1998年に発見した結果を写真8に示します。茎に与えたカルシウムは、驚くほどすばやく地上部すべての葉に転流します。同じ部位にリンを与えても、それほど茎から吸収しません。初めて実験結果を見た時は、大発見だと興奮したものです。植物は養分を根からだけ吸収すると思いきや、根から吸収されず、カルシウムは茎からも吸収されるのです。しかも第1図に示すように、茎に与えたカルシウムは10時間までは根からの吸収速度よりも速く、量も多いのです。これは、カルシウムは葉よりも茎に散布した方がよいことを示しています。また、トマト果実表面に与えたカルシウムも内部に転流することを確認しました。

シュンギク心腐れ症の事例  
こうしたカルシウムの挙動が判明した後に、シュンギクのカルシウム

第1図 各部位からのカルシウムとリンの吸収転流量の比較

(渡辺和彦 原図)



注: 茎、葉からの吸収転流量は、比較のため根に与えたのと同量を施用したと仮定し、計算。実際の地上部への施用量は、Caはこの1/640、Pは1/208。このグラフでは、縦軸で吸収量の比較もできる。

ハウ素は葉面散布効果の出やすい作物と、出にくい作物があることが知られています。その要因の一つは1996～1999年のブラウンらの研究により明らかになりました。

## ハウ素の葉面散布



こうした生理障害の発生程度に品種間差は大きいこと、またハウス内に微風が起るようになると、心腐れ症の発生が少なくなることは現地でもよく知られています。

欠乏症、心腐れ対策にカルシウム資材の葉面散布を行う試験を現地で実施しました(写真9)。結果は明らかに葉面散布効果が認められました。試験栽培の収穫時期が、シュンギクの高値の時期と偶然重なり、葉面散布は100%の防止効果ではなかったものの、農家に喜ばれ、ほっとしたことを思い出します。もちろん、

写真9 シュンギクの心腐れと調査風景(渡辺和彦 原図)



注：写真上はシュンギクの心腐れ症状、写真下は普及センター所長も参加してのカルシウム葉面散布剤の効果確認。5～7日ごとの複数回散布だが、発生率低下は明白であった。

また、ソルビトールのハウ素転流促進効果を証明するため、通常はソルビトールを作らないタバコにリンゴ由来のソルビトール合成酵素遺伝子を導入し、ソルビトールを産生するようにしたタバコと、ソルビトールを産生しないタバコを試し、栽培途中からハウ素を欠如させた、ハウ素の葉面散布実験をしています。ソルビトールを作らない通常のタバコではハウ素を葉面散布しても不稔<sup>ふねん</sup>が多いのですが、ソルビトールを産生する形質転換タバコではハウ素の

トールの形態で転流されます。ブラウンらは、<sup>10</sup>B<sub>8</sub>を用いた追跡実験で、こうした作物では、葉面散布されたハウ素は、ほかの葉や組織へ移行するものの、ソルビトールをほとんど産生しないピスタチオやクルミについては、ほかの組織へ移行しないことを実験データで示しています。

具体的には、多くの植物は葉でできた光合成産物を他器官へシヨ糖の形態で転流しますが、リソゴ、アーモンド、ネクトリンなどではソルビ

間藤徹は糖アルコールを転流糖としないヒマワリでの実験で、ハウ素供給を停止した後も水溶性のハウ素は上位葉でも下位葉でも減少し、特に上位葉では水溶性ハウ素が検出されなくなるまで低下することを確認しています。また、ダイズでも生育途中からハウ素を欠如しても下位から新しい枝が分岐してきます。すな

## ハウ素は師管を転流し、再利用される



葉面散布により不稔も少なくなり、培地からハウ素を除去しなかったタバコとほぼ同等の子実重が収穫できることを示し、ハウ素の師管転流におけるソルビトールの重要性を証明しています。ハウ酸が、二つの水酸基を同じ方向(シス位)に持つジオール化合物と容易に結合することはよく知られています。ハウ素が結合しやすい糖アルコールには、ソルビトール以外にマニトール、ズルシトールがあります。糖アルコールを転流糖としている作物は、前記以外では、ナシ、モモ、プラム、ナナカマド、野菜ではセルリーがマニトールを産生します。そして、これらは葉面散布効果が出やすいことが知られています。

シュンギクのマンガン欠乏対策と

## 根には転流しないマンガン



わち、ハウ素が全く再転流しないのなら、こうした現象もないはずですが、再転流には師管転流が必要です。間藤によると、糖アルコールがなくともハウ素は師管内を転流できます。生長点の急激なハウ素要求量を十分に満たすほど速くは転流できませんが、周辺の上位葉からのハウ素はかなり先端葉に転流しています。間藤の結果と比較すると、ブラウンらの糖アルコール説は極端すぎるようです。師管中のハウ素が9～11ppm(0.8～1mM<sub>9</sub>)もあることを考えると、ハウ素は明らかに再転流しています。ハウ素不足のダイズで、ハウ素の葉面散布で増収したとの報告があります。ほかの作物でもハウ素の葉面散布は期待できそうです。試験では0.1%ハウ砂(B・113ppm)を使うことが多いのですが、千葉農試ではトマトで7日ごとに5回散布、兵庫農試ではハクサイで5日ごとに10回散布で、ハウ素過剰障害の例がありますので、散布濃度、回数には注意が必要です。



して、0・2%の硫酸マンガンの葉面散布は1回だけでも見事な回復効果を示します。ところが、葉に散布したマンガンは地上部の師管には転流しますが、根の師管には入りません。根のマンガン欠乏対策に葉面散布を行うのは無益なことです。マンガン欠乏は根のリグニン含量を低下するため、病害虫被害を受けやすくなります。この現象は非常に重要で、詳しくは次号で説明します。

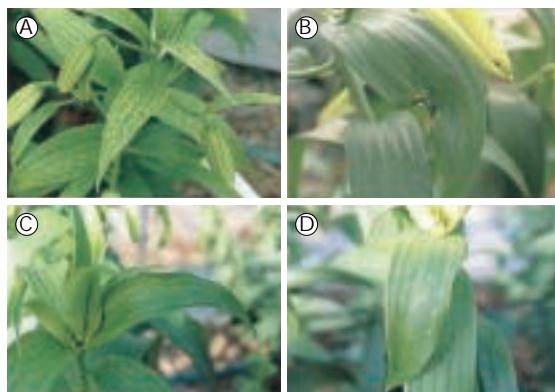
## 鉄の散布濃度と散布形態



土壌pHが高くなると、作物は鉄をはじめとして亜鉛、マンガンなどの欠乏症を生じます。糸川修司らは、高pH土壌で栽培したオリエンタル系ユリの上位葉がまだらに黄白化する、まだら症（写真10）の対策として、鉄、マンガン、亜鉛の葉面散布について詳細な研究を数年にわたり実施しており、現地では土壌中の可給態亜鉛含有率の低い土壌が多く、亜鉛の葉面散布効果が高いことを明らかにしています。しかし、生理障害発生地域によっては、鉄とマンガンの葉面散布により障害が軽減されることもあるため、実用的には散布液は三元素を混合したものがよいとして

写真10 ユリまだら症と葉面散布による障害症状

（糸川修司 原図）



注：写真Aは高pH下で生じるユリまだら症の症状。Bは0.2%硫酸第一鉄による障害。Cは塩化亜鉛（Zn：200ppm）による障害。Dはキレート鉄（Fe：200ppm）による障害。

第3表 鉄の散布試薬の違いと葉中の鉄含有率など（糸川修司ら・2005）

散布試薬	葉害発生度	葉中のFe含有率(ppm)
硫酸第一鉄	17.9	121
硫酸第二鉄	4.4	114
キレート鉄	27.0	169
クエン酸鉄	4.6	193
脱イオン水（対照）	0.0	33

注：散布試薬の鉄濃度は15ppm。1週間おき9回散布。

$$\text{葉害の発生度} = \frac{(\text{指数} \times \text{指数別株数})}{3 \times \text{調査株数}} \times 100$$

指数（葉、茎、花蕾に発生した黒色または茶褐色の斑点の大きさ。0：なし、1：極小、2：小、3：大）鉄の分析部位は第一花蕾直下の葉から上位の葉とした。表示は乾物当たり。

用するのがよいとし、第3表の再確認試験では使用していません。糸川らの試験はもちろん、ほかの文献も参考に濃度障害の出にくいこれら元素の限界濃度を第4表に示しました。マンガンや亜鉛に比較して

酸第一鉄、硫酸第二鉄、塩化鉄、EDTA鉄、クエン酸鉄を供試し、各種濃度で濃度障害発生程度や吸収量を比較しています。第3表に関連試験結果を示しますが、作物への鉄吸収量はクエン酸鉄が多く、塩化鉄、EDTA鉄の順で硫酸塩はやや劣ります。しかし、吸収量の多いクエン酸鉄やEDTA鉄は価格も高く、塩化物は硫酸塩よりも濃度障害が生じやすいため、硫酸塩を使用

鉄は濃度障害が出やすいのです。

なお、一般

農家の方には

試薬から調査

するより市販

の葉面散布剤

の使用をおす

めます。

各製品とも使

用上の注意点

さえ守れば濃

度障害が出ず、

効果が出やす

いよう工夫さ

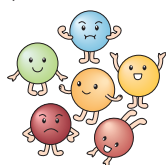
れているため

第4表 濃度障害の出にくい葉面散布の濃度限界例（渡辺和彦・2005）

物質名	俗称	化学式	物質濃度(%)	同左元素	
				(ppm)	(mM)
硫酸鉄( )・七水和物	硫酸第一鉄	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.005	10	0.18
硫酸亜鉛・七水和物		$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.02	45	0.7
硫酸マンガン・五水和物		$\text{MnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.2	456	8.3

注：昔の文献では、ボルドー液を参考に、濃度障害防止と効果の持続性を考慮し、石灰を加用した場合が多く、本表より高濃度である。特に、果樹類での使用濃度は高い。作物により許容濃度は異なり、ここでは野菜、花き類を対照とした論文より取りまとめた。

## 葉面散布の新たな機能



肥料の葉面散布は、土壌施用よりも少量で済むため環境にやさしい。

病害抵抗性誘導機能があり、農薬の使用量を減らせる。

根の伸長促進や根圏微生物相の改善効果もある尿素の項で一部紹介。

については、第8章で詳しく解説します。