

果実の成熟・品質の制御

ーカルシウム等による生理障害の防止(リンゴ)ー

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹研究所
果実鮮度保持研究チーム 井上博道

リンゴ果実における生理障害の要因として、果実中のカルシウム欠乏が挙げられることが多い。そこで、カルシウムの土壌からリンゴ樹体内までの動きを整理するとともに、カルシウム欠乏の発生とその対策について考えることにする。

1. 土壌中でのカルシウム

カルシウムは土壌中で多く含まれる元素で、水素、酸素を除いた土壌中の元素組成を見ると、粘土鉱物の構成成分であるケイ素やアルミニウム、酸化物鉱物が多い鉄、有機物の構成成分である炭素、に次いで多く、中央値で見ると土壌中元素の1.5%がカルシウムである(表-

1)。ほとんどの土壌ではカルシウムは炭酸塩やリン酸塩の形態で多く存在している。通常1ha当たり20t以上のカルシウムがあり、そのうち4~5tは植物に吸収可能な形態で存在している(Baeber et al., 1963)。カルシウムは植物にとって多量必須元素でありながら、窒素、リン、カリウムのように毎年のように施肥が必要とされないのは、土壌に可給態の形態で多く含まれているためである。ただしカルシウムは土壌中の移動性が高く、雨水等により容易に溶脱する元素であるため、土壌表層(作土)の可給態のカルシウム(交換性カルシウム)が少なくなった場合には適宜散布する必要が出てくる。リンゴでは、土壌中に交換性カルシウムが十分量あっても、土壌・施肥管理や栽培管理などの問題により果実にカルシウム欠乏が発生する場合がある。

2. カルシウムの吸収、転流

カルシウムイオンの吸収は主にマス・フロー(mass flow; 作物の水吸収に伴って土壌溶液中の養分が移動)によって行われるが、拡散(土壌溶液中の濃度勾配に従って移動)によっても行われているように見える(Smith and Wallace, 1956)。土壌溶液中のイオン含量は土壌によって異なるが、一般的には全イオンの60-80%はカルシウムイオンである。

表-1 土壌の元素組成の中央値と範囲

元素	中央値, mg/kg soil (範囲)
Si	330,000 (250,000-410,000)
Al	71,000 (10,000-300,000)
Fe	40,000 (2,000-550,000)
C	20,000 (7,000-500,000)
Ca	15,000 (700-500,000)
K	14,000 (80-37,000)
Mg	5,000 (400-9000)
Na	5,000 (150-25,000)
Ti	5,000 (150-25,000)
N	2,000 (200-5,000)
Mn	1,000 (20-10,000)
P	800 (35-5,300)
S	700 (30-1,600)
Ba	500 (100-3,000)
Zr	400 (60-2,000)
Sr	250 (4-2,000)

(浅見・茅野, 1983より抜粋)

代謝が活発に行われる葉、花、果実、頂端分裂組織は、カルシウムの「シンク」である。根から樹の他の器官への転流は、蒸散流（蒸散に伴う植物体内での水分の流れ）の度合いによって異なる。カルシウムの転流速度は遅い。カルシウムの転流は、半分はイオン、半分はリンゴ酸もしくはクエン酸との化合物として（Bradfield, 1976）特に木質部で起こっている（Levitt, 1969）ことが木質部と篩部樹液の分析から分かっている。イオン交換が転流中に行われている間、陽イオン交換容量が飽和したり、カルシウムが有機酸とキレート化したのであれば、転流速度は上昇する。その場合は、転流速度と蒸散速度が比例関係にあるようである（Geijn et al, 1979）。

カルシウムは細胞内に固定されるので、再転流しようとしてもほとんど移動できない。カルシウムの固定のため、古葉には十分にカルシウムが含まれていても、新葉や果実ではカルシウム欠乏が起こりうる（Meyer and Anderson, 1952）。古葉のカルシウム含量は果実のカルシウム含量に反映されない（Shear and Faust, 1971; Chiu and Bould, 1977）。このように、カルシウムは植物体内での移動性が低く、さらに再転流も起こりにくいため、果実へのカルシウム供給が継続的に行われない状況ではカルシウム欠乏による生理障害が発生しやすい。

3. 樹体内でのカルシウム分布と役割

年間ha当たり5-6tの乾物生産を行っているリンゴ樹では約25kg/haのカルシウムを必要としており、そのうち1kgは果実で、10kgは根、幹、枝で、15kgは葉で使われる。乾物重当たりで見ると、根と幹では1.2%、枝では0.6%、葉では1.0~1.5%、果実では0.02%のカルシウムが含ま

れている。樹全体で見ると果実におけるカルシウムの割合は低いので、果実生育期間中に、どれだけ継続的に果実へのカルシウム供給が行われるかが果実のカルシウム欠乏を防ぐ上で重要となる。

植物体内におけるカルシウムの役割は、細胞組織の構造維持、植物体内で生じた有機酸の中和、いくつかの酵素の活性剤などがある。細胞壁のペクチンを主成分とする中層にカルシウムは多く存在し、ホウ素とともにペクチンを架橋して生体膜の安定性を強化している。カルシウム欠乏下ではその中層が希薄になり、病原菌の養分になりやすいアミノ酸、糖などの細胞成分が細胞外へ流出し、侵入してきた病原菌が増殖しやすくなる。カルシウムは細胞内シグナル伝達機能のメッセンジャーとしての役割を持っており、生理的な病害抵抗反応のシグナル伝達にも関与している（Knight, et. al., 1991）。イネではケイ素によっていもち病を筆頭に各種病気の耐病性が高まることが近年明らかになっているが、リンゴにおけるカルシウムも同様の効果を持つと考えていいのかもしれない。

4. カルシウム欠乏

カルシウム欠乏の兆候は若い葉が丸まったり、クロロシスが現れることで6月初めに起こる（Shear, 1971）。ただしこれら葉の兆候が見られなくても、収穫期前あるいは貯蔵中に果実に斑点性生理障害が起こることもある。

斑点性生理障害のうち、ビターピットは果実の赤道面から下部のていあ部にかけての果皮に発生する2mmから10mm程度の浅くくぼんだ暗褐色の斑点のことで、斑点直下の果肉は3mm程度の深さまで褐変してコルク化している場合が多い。ビターピットの発生は収穫1ヶ月前頃

からみられ、収穫後の貯蔵中にも発生する。8月～9月初めに、果皮には変化はなく、果肉にコルク化した褐色小斑点の発生が現れる場合もあるが、これはコルクスポットとしてビターピットとは別に扱われている。ただしコルクスポットも発生要因としては果実のカルシウム欠乏が主要因と考えられている。

ビターピットの発生を予測する場合、幼果のカルシウム濃度が判断基準となる。1果300gの‘玉林’では7月上・中旬の幼果期に1果当たり5.5mgのカルシウムを含んでいれば安全で、少なくとも3.5mg以上のカルシウムが必要と考えられている（福元ら、1987）。

ビターピットの発生を助長する栽培管理としては、窒素の過剰施肥、強剪定、大玉化、カリウム、マグネシウムの過剰などが挙げられる。‘陸奥’、‘玉林’などは収穫期が早すぎるとビターピットの発生が多くなる（蝦名、2002）。窒素の過剰施肥と強剪定は樹の新梢や葉の生育を旺盛にし、新梢や葉が過繁茂状態になる。必要以上のこれら器官の繁茂により、本来果実へ供給されるべきカルシウムが葉や枝で使われることにより、結果的に果実のカルシウム欠乏につながる。摘果を強くし大玉化を目指す場合は1果当たりのカルシウムの供給が間に合わないことで、カリウム、マグネシウムの過剰供給は果実

へのカルシウムの供給を抑制することで果実のカルシウム欠乏につながる。

リンゴの貯蔵中に発生する果肉褐変には、果心部の方から褐変の始まる内部褐変と、果皮表面に近い果肉部位から褐変が進むゴム病と呼ばれる障害があるが、これらについても（特にゴム病は）果実のカルシウム含量低下が発生に関わっていると考えられている。ゴム病は果肉外層部に発生する障害で、果実のがくあ部から赤道部にかけての部位から発生することが多い。発生部位では果肉の軟化、褐変、維管束の濃褐色化が起こり、ゴムのような弾力性が感じられる。障害果の果皮、果肉中のカルシウム濃度は健全化よりも低く、発生が多い品種である‘紅玉’に7～8月に塩化カルシウムを散布することによって、7.5～18%発生していたゴム病が0～3.6%に抑えられたとの事例がある。

5. カルシウム欠乏の対策

ビターピットの発生を回避するためのカルシウム欠乏対策として、各種カルシウム資材の葉面（果面）散布が行われている。その資材は塩化カルシウム、硫酸カルシウム、炭酸カルシウム、蟻酸カルシウムなどである（表-2）。これらの資材はその主成分によって溶解度が大きく異なる（表-3）。リンゴ果皮にカルシウム資材を塗

表-2 葉面散布用カルシウム剤の例

銘柄	主成分	CaO (%)
カルシウムエキス	キレートカルシウム	8
カルハード	有機キレートカルシウム液剤	11
キレストCa	EDTA-Ca	8.9
スイカル	蟻酸カルシウム	42
セルバイン	クエン酸カルシウム、塩化カルシウム他	25
クレフノン	炭酸カルシウム	53
カルクロン	塩化カルシウム	38
アグリメイト	有機酸カルシウム(6)、塩化カルシウム(7)	13
リーフアップCa	蟻酸、酢酸、乳酸カルシウム	30
カルパワー	水酸化カルシウム液剤	4～8
ダーウィンFC100	硫酸カルシウム	31
アクアカル	酢酸カルシウム	12

表-3 カルシウム塩の溶解度

化合物名	(g/100g)
硝酸カルシウム	266
塩化カルシウム	59.5
酢酸カルシウム	52
蟻酸カルシウム	16.1
乳酸カルシウム	7.1
リンゴ酸カルシウム	0.92
水酸化カルシウム	0.185
硫酸カルシウム	0.16
クエン酸カルシウム	0.0849
炭酸カルシウム	0.0012
リン酸カルシウム	不溶

表-4 ビターピット対策としてのカルシウム剤の散布方法の例

銘柄	散布時期	散布倍率	散布回数	県名
カルクロン (塩化カルシウム)	6上～7下	330	4～5	青森, 山形
	6上～	250～500	3～4	福島
	6下～	250～500	4～5	長野
スイカル	7下～9中	300	3～5	青森
	7下～8下	300～500	3	岩手
	6～7中	1000	3～5	岩手
	6下～9下	1000+500	3+2	秋田
	7下～9中	300	3～5	山形
	8～9	200	3～5	山形
	6上～	300～500	3～4	福島
	落花10日～8下	100～300	3	長野
	落花10日～8下	1000	3～6	長野
セルバイン	6上～9上	400	3～5	青森
	6～8下	400～800	3～5	岩手
	6上～6下～9下	800+400	3+2	秋田
	6上～	400	3～4	福島
	落花10日～8下	400	3～5	長野
カルハード	7下～8下	1000	3	岩手
	6～7中	1000	3～5	岩手
	6下～9下	1000	3～5	秋田
	6上～	1000	3～4	福島

布した場合、無機カルシウム塩の方が有機カルシウム塩よりも吸収量が高いことが示唆されており(小松ら, 2006), 溶解度が高いほどリングに吸収されやすいわけではないが, 溶解度が高くかつ溶液中でカルシウムイオンの状態で存在する(キレート化していない)資材であれば, リングに吸収されやすいのではないと思われる。リングに吸収されやすい資材では使用方法によって葉害が現れる。特に, 溶解度の高い塩化カルシウムを主体としたカルシウム剤を8月以降に散布した場合では, 葉が褐変するなどの葉害が発生する。おそらく希釈した塩化カルシウムの水分が蒸発することによって葉に散布された薬剤が濃縮し, 塩素障害が現れるのではないかと推測される。そのため, リング生産各県においてはカルシウム資材の散布方法, 回数, 時期などを指導している(表-4)。またカルシウム資材によっては, その散布によりリング果面の油上がりの発生軽減や果実硬度を高めること

につながる事が報告されている(青森県りんご試, 1990; 岩手県園試, 1995)。

植物体内での移動性が低く, 葉から果実へ十分に転流しないカルシウムの果実中濃度を高めるためには, 葉面散布よりも果面散布が有効である。さらに収穫後に発生するビターピットあるいは果肉褐変(ゴム病)の発生抑制のために, 収穫後の果実をカルシウム剤に浸漬する処理についても検討されている。浸漬剤として塩化カルシウムを用いる場合, 加圧浸透処理, 減圧浸透処理, 浸漬処理の順でリング果実へのカルシウムの取り込み量が多くなり, 病原菌による果実腐敗を減らすのに必要な濃度(0.8-1.0 mg / g Dry Weight)まで容易にカルシウム濃度を増加できるようである。欧米では収穫直後に4%塩化カルシウム液に数分間浸漬し, 果実のカルシウム濃度を高め, 特にゴム病の発生を抑えている。ただし, 塩化カルシウム溶液の収穫後処理によって果面障害が起こる可能性があること

が問題視されている。

現在、ピターピット軽減目的で生育調整剤の試験が行われているのは水溶性カルシウム95%のカルシウム剤で500倍希釈液を落花10日後から5回散布(7~10日間隔)で行っている。対象品種は‘ジョナゴールド’‘ニュージョナゴールド’‘王林’である。かつてボルドー液(硫酸銅+石灰)を散布していた頃に比べ、無ボルドーの薬剤散布体系にした園地ではカルシウム欠乏が発生しやすくなり、その対策として1%炭酸カルシウムを散布しているところが多い。リンゴの場合、土壌への施肥では効果が低く(遅く)、収穫後の果実への処理では問題があるカルシウムに関しては、生理障害の防止だけでなくカルシウムによる耐病性向上の面からも、現在の薬剤散布体系の中に適切なカルシウム剤を組み入れて定期的に散布することが現実的な対応策であろう。

謝辞 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹研究所長の福元将志博士には本稿を校閲して頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 浅見輝男・茅野充男. 1983. 環境無機化学. p.67-70.
- 青葉幸二. 1991. 吉田義雄ら編. 最新果樹園芸技術ハンドブック. p.270-273.
- 福田博之. 1985. 伊庭慶昭編. 果実の成熟と貯蔵. p.98-115.
- 加藤秀一. 2002. 季刊肥料, 92: 63-69.
- 前川和正・渡辺和彦. 2004. 日本土壤肥科学会編. 施肥管理と病害発生. p.115-124.
- Saure, M.C. 2005. *Scientia Horticulturae*, 105: 65-89.
- Vang-Petersen, O. 1980. *Scientia Horticulturae*, 12:1-9.
- #### 引用文献
- 青森県りんご試・化学部. 1990. 平成元年度東北農業成果情報, 4: 99.
- Baeber, S.A., Walker, J.M. and Vasey, E.H. 1963. *Agric. Food Chem.*, 11:204-207
- Bradfield, E.G. 1976. *Plant Soil*, 44:495-499.
- Chiu, T.E. and Bould, C. 1977. *J. Hortic. Sci.*, 52:19-28.
- 蝦名春三. 2002. 果実日本, 57(8): 26-29.
- 福元将志・青葉幸二・武藤和夫・榎村芳記・吉岡博人・藤本国夫. 1987. 土壤肥科学雑誌, 58: 691-695.
- Geijn S.C. van de, Petit, C.M. and Roelofsen, H.W. 1979. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 10:225-236.
- 岩手県園芸試験場・果樹部. 1995. 平成6年度東北農業成果情報, 9:109.
- Knight, M.R., Cambell, A.K., Smith, S.M. and Trewavas, A.J. 1991. *Nature*, 352: 524-526.
- 小松正孝・松橋宏和・伊藤正・飯島章彦. 2006. 土壤肥科学会講演要旨集, 52: 140.
- Levitt, J. 1969. *Introduction to Plant Physiology*. C.V. Mosby, St. Louis.
- Meyer, B.S. and Anderson, D.B. 1952. *Plant Physiology*. Van Nostrand, New York.
- Shear, C.B. 1971. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 96: 415-417.
- Shear, C.B. and Faust, M. 1971. *Plant Anal. Fert. Probl., Rec. Adv. Plant Nutr.*, R.M. Samish(Editor), 1:75-98.
- Smith, R.L. and Wallace, A. 1956. *Soil Sci.*, 82:9-19.