

図 3-3 土壌 pH と 肥料要素の 溶解・利用度

土づくり肥料の Q&A (改訂 5 版), 土づくり肥料推進協議会 2008, p.3 より (原典: Truog 1949)

(イ) pH の測定および pH メータの保守

pH の測定は基本的に pH メータ (ガラス電極式) によるが、現地では万能指示薬 (p. 141 参照) や pH 試験紙の使用も有効である。pH メータは測定前に標準液 (通常 pH 7, pH 4) で校正を行う。比較電極内部液は補充口の少し下まで満たし、1 ヶ月に 1 回程度、全て交換する。一般的な pH 電極には比較電極内部液により、主として以下の 2 種類がある。

- ① 内部液に塩化カリウム (KCl) の飽和溶液を用いるもの。液中に析出した塩化カリウムの結晶が見えれば使用に問題はない。
- ② 塩化カリウムの 3.3 M 溶液を用いるもの。近年多いタイプで、通常、電極内部に内部液の濃度低下を知らせるフロートがついている。

土壌 pH の測定は、上澄み液ではなく懸濁状態で行う。測定時には、電極の液絡部 (セラミック等でできた微細な通液部) が試料液に浸かっていることを確認し、比較電極内部液の補充口の蓋を開けて液絡部からの内部液の浸出を促す (この浸出・連絡が安定した比較電位を得るための試料液との電気的な接点となっている)。

pH 電極の感知部は薄いガラス膜なので、衝撃を与えないよう注意する。測定後は電極を蒸留水等で洗浄し、説明書に沿った方法で管理する (通常は蒸留水に浸漬する)。

【pHメータの数値が安定しない場合】

機器の管理・調整面では、標準液や内部液の劣化、それらの極端な温度差、電極の汚れや破損などが考えられる。測定反復の差が大きい場合は試料の均質性を疑う。

【pH測定の留意点】

- ・ 土壌 pH は懸濁液で測定する。土壌粒子の沈降程度により数値が変化するため*、測定直前にも軽く振とうして、上澄み部分があまり分かれないうちに測定する。
- ・ 電極の使用、洗浄、保管方法は各製品の説明書にしたがう。不使用時の電極の保管方法（内部液補充口の開閉など）は製品や目的とする測定精度により異なる。
- ・ pH 標準液は一般的に pH 9（通常は不使用）> pH 7 > pH 4 の順に劣化が早い。
- ・ 理化学用ガラス器具で主流のホウケイ酸ガラスはアルカリ分の溶出が少ないが、ごく一般的なガラス（ソーダ石灰ガラス）はアルカリ分が溶出しやすい。

＜* サスペンション（懸濁液）効果＞

電極を土壌懸濁液の上澄み部に入れたときと沈降部に入れたときとで、pH 指示値が異なる現象。一般的には土壌コロイドの影響により、沈降部で pH 値が低くなる。

ウ 土壌の電気伝導度（Electric Conductivity、EC）

（7）ECの基礎と概要

ECは電気の通りやすさの指標で、土壌の水溶性塩類の総量を反映する。純粋な水はほとんど電気を通さず、主に溶け込んだイオン類を介して電気が通じることから、肥料成分等が多いと土壌のECも高くなる。ECが極端に高い場合は土壌溶液の浸透圧が高いため、作物の吸水が抑制される。ECの変化には土壌の緩衝能が影響し、同等の施肥を行った場合、ECは一般的に砂質土壌で上昇しやすく、陽イオン交換容量（CEC、後述）の大きな土壌では上昇しにくい。また資材施用に関して、近年の堆肥は環境への配慮から、基本的に雨よけ施設内での製造であり、ECが上昇傾向にあるので注意する。

（イ）土壌のECの測定

ECの測定には、ECメータ（電気伝導度計）を用い、土壌懸濁液（土液比1：5）で測定する。水溶液のECは一般的に温度にほぼ比例し、温度が上昇するとECも高くなるため、25℃温度補正值とする（ECメータの温度補正をオートにしておく）。測定後は電極を蒸留水等で洗浄し、蒸留水に浸けておく。

【ECに関する留意事項】

- ・ 単位は近年、dS/m（デシジーメンス/メートル）がよく用いられるが、表示が異なるECメータもあるので注意する（1 dS/m=1 mS/cm=1,000 μS/cm=100 mS/m）。
- ・ 電極の使用、洗浄、保管方法は各製品の説明書にしたがう。電極の浸漬の深さや、測定容器内面からの電極の距離について指定がある場合がある。
- ・ EC標準液の一例として0.01 M塩化カリウム溶液（高純度KCl 0.7456 g/L）があり、そのECは25℃で1.41 dS/mである。標準液やチェック液は市販されている。

(I) ECに基づく土壌診断の留意点

かつて土壌のECは、硝酸態窒素含量との相関関係が全国的に散見され（図3-4）、簡易分析機器もあまり一般的でなかったため、窒素施肥の診断に利用されることもあった。しかしECには各種イオン濃度とそれらの活動度が総合的に反映されるため、硝酸態窒素含量のみと相関が高いわけではない（一例、表3-1）。したがってECは土壌塩類濃度の指標にとどめ、施肥調整のための診断ではpH、EC、硝酸濃度（RQフレックス）などをセットで行い、土壌の養分状態を把握することが望ましい（→ p.134のフローチャート参照）。

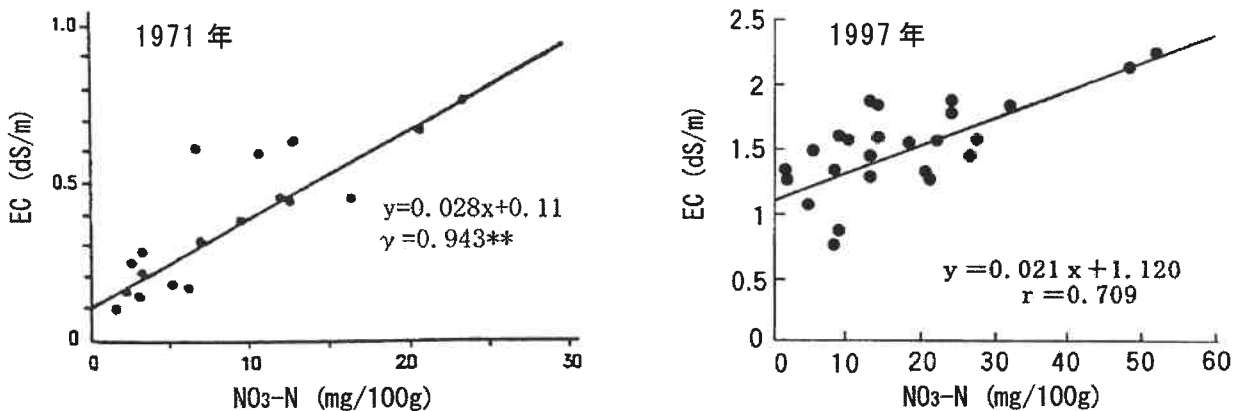


図 3-4 土壌のECと硝酸態窒素との相関の変化（県内の同じ施設葉物野菜産地）

土壌の養分集積が進みECが高い1997年の例では相関はあまり高くなく、ECによる圃場単位での硝酸態窒素の推定は困難とみられる。

表 3-1 土壌抽出液（1：5）のECと陰イオンとの単相関係数

硝酸態窒素 (NO ₃ -N)	リン酸 (P ₂ O ₅)	硫酸根 (SO ₄ ²⁻)	塩素 (Cl ⁻)
0.511*	0.164	0.866*	0.772*

*は1%有意（=相関が認められる。）

エ 土壌の望ましくない状況とその対策

(ア) 土壌の pH, EC が作物に与える影響

土壌が pH 4.0 以下になると水素イオンが直接、植物根の働きを阻害する。pH 5.0 以下では植物に有害なアルミニウムイオンが土壌から溶け出し、土壌溶液中の濃度が 1 ppm (1 mg/L) を超えると一般的な作物では生育が阻害される。

アルミニウムイオンの増加はまた、リン酸と結合してその肥効を低下させる。酸性化により、窒素やリン酸、カリウム、カルシウム、マグネシウム、ホウ素、モリブデンなどの養分が利用されにくくなり欠乏症を起こしたり、マンガンや鉄、銅、亜鉛などの微量元素が多く溶け出して過剰症を起こすこともある。逆にアルカリ化すると、マンガンや鉄、銅、亜鉛などの微量元素は吸収されにくくなり、欠乏症を生じることがある。

土壌の EC が高くなると、品目によっては土壌中成分の過剰や浸透圧の上昇により、塩害を生じる。

(イ) 土壌の pH, EC 対策の基本的な考え方

以下に土壌の pH, EC に基づく基本的対策、および pH の矯正の方法を記す。特に露地ほ場では、降雨による塩基類の流亡や生理的酸性肥料の施用によって土壌の酸性化を招きやすい。しかし pH が低くても、一時的な硝酸態窒素の集積が原因のこともある（表 3-2）。したがって EC や簡易分析のデータも考慮した、総合的な診断を基本とする。土壌の pH と EC の対策は連動しているが、特に pH は要因が複雑で、短期間での適正範囲への矯正が難しいことが多い。そこで pH 対策を中心に以下に述べる。

表 3-2 土壌 pH と EC に基づく診断と対策（主に施設土壌を想定）

土壌のタイプ	考えられる原因と対策
高 pH・高 EC	肥料成分が概して過剰。 除塩対策を行い、減肥・無肥料栽培を検討する
低 pH・高 EC	硝酸、硫酸などの陰イオンが集積しており、石灰質資材の施用による解決は困難。 まず、窒素施肥の過多を疑い、除塩を検討する。
高 pH・低 EC	塩基成分、特に石灰が多く、窒素肥料が少ないことが多い。 硫安、硫酸カリなど、硫酸系肥料の使用を検討する。
低 pH・低 EC	全体的に肥料成分の不足の傾向。 肥料や有機質資材の施用を増やす。土壌改良は比較的容易。

土壌診断の方法と活用，農文協 1996 に基づき作成

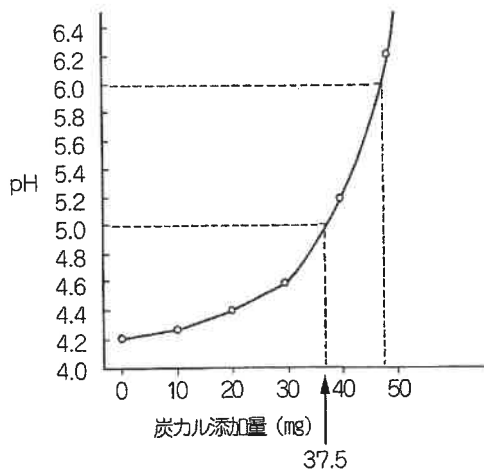
(ウ) 土壌 pH が作物の適正值より低い場合

塩基類の不足が低 pH の主因の場合はアルカリ資材の施用を要するが、土壌の種類によってその効果は異なり、緩衝能の大きな土壌では pH 矯正に多量の資材を要する。特に黒ボク土は緩衝能が大きく、酸性化が進行すると pH 矯正が難しい。アルカリ資材の施用にあたっては、矯正後の塩基バランス（石灰/苦土比，苦土/カリ比）にも留意し、交換性苦土の乏しい土壌では苦土を含む資材を用いるとよい。

a 中和石灰量の測定（緩衝曲線法）

10 g 相当量の風乾細土（注：黒ボク土のように吸湿性が高い土壌もある）に粉状炭酸カルシウム（以下「炭カル」、試薬ではアルカリ分 56%）を 0、10、20 mg などと添加し、蒸留水を加えて 1 日以上放置したのち pH を測定する。その際、土壌懸濁液中に毎分約 2 L、2 分間空気を吹き込み（エアポンプ等を使用）、発生する二酸化炭素を追い出したのち直ちに pH を測定する。グラフの横軸に資材添加量、縦軸に pH をとり、目標とする pH と曲線の交点を垂直に下げ、必要な炭カル量を求める。次いで、実際に用いる資材のアルカリ分に基づき、その施用量を算出する。現場対応的には投入予定の資材を用いて同様に操作し、必要量を算出してもよい。その場合、粒状資材は事前に乳鉢ですりつぶして反応性を高め、また資材によっては炭カルと同様、二酸化炭素の発生に注意する。

作土深 10 cm、仮比重 1 と仮定すると 10 a 当たりの土量は 100 t となる。pH 矯正に必要な資材量が 10 g 当たり 50 mg とすると、10 a に要する資材量は 500 kg となる。



注：この図では、pH 4.2の土壌をpH 5.0に上げるためには土壌20gに37.5mgの炭酸カルシウムが必要である。10 a、深さ10cmの土壌100 tに対しては187 kgの施用量となる。この緩衝曲線は同じ土壌にはそのまま使えるので、測定した pH が5.0であった場合、これを6.0まで上げるためには、 $48.0 - 37.5 = 10.5$ mg、10 aの土壌に対しては52 kgとなる。

図 3-5 緩衝曲線の例と炭カル施用量の求め方（この例では未風乾土 20 g の供試を想定）

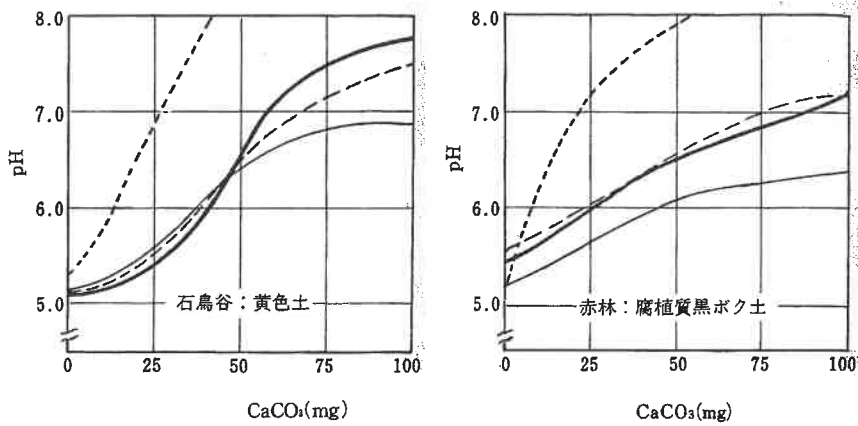
図・説明文とも施肥診断技術者ハンドブック，J A 全農肥料農薬部 1999，p. 194 より

<アルカリ分>

資材に含まれる（石灰質資材では 0.5M 塩酸可溶の）石灰と苦土のアルカリ総量を酸化カルシウム (CaO) の重量% に換算した数値（酸度矯正力の指標）。

$$\text{アルカリ分 (\%)} = \text{CaO\%} + (\text{MgO\%} \times 56/40) \quad [\text{分子量 : CaO}=56, \text{MgO}=40]$$

前記の試薬炭カルの場合は、 $\text{アルカリ分 (\%)} = (\text{CaO}/\text{CaCO}_3) \times 100$



図V-1 各分析法による緩衝曲線 (千葉・新毛, 1977)
 — インキュベート法 — 炭カル添加法
 - - 炭カル添加・通気法 (2分間) - - - 水酸化ナトリウム添加法

図 3-6 各分析法による緩衝曲線の例

同じ炭カル添加法でも、通気 (CO₂ の追い出し操作) の有無により曲線が大きく異なり、通気なしでは pH 上昇効果が過小評価されている。土壤環境分析法, 土壤環境分析法編集委員会編, 博友社 1997, p.200 より抜粋

b 中和石灰量の目安：アレニウス表換算法

簡便法としてアレニウス表によるアルカリ資材量の算出法がある。主として畑土壌の改良に用いられ、pHを6.5に矯正するときの炭カル施用量が示されている。

表 3-3 アレニウス表による酸性矯正用炭カル施用量 (kg/10a)

(矯正目標 pH6.5 (H₂O) 10a 深さ 10cm 当たり)

土性	腐植	pH												記号 土性	
		4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2		6.4
砂 壤 土	含む	424	390	356	323	289	255	221	188	154	120	86	53	15	SL
	含む 富む	634	581	533	480	431	379	330	278	229	176	128	75	26	
	すこぶる富む	986	908	829	750	671	593	514	435	356	278	199	120	41	
壤 土	含む	634	581	533	480	431	379	330	278	229	176	128	75	26	L
	含む 富む	844	776	709	641	574	506	439	371	304	236	169	101	34	
	すこぶる富む	1,268	1,166	1,065	964	863	761	660	559	458	356	255	154	53	
植 壤 土	含む	844	776	709	641	574	506	439	371	304	236	169	101	34	CL
	含む 富む	1,054	971	885	803	716	634	548	465	379	296	210	128	41	
	すこぶる富む	1,549	1,425	1,301	1,178	1,054	930	806	683	559	435	315	188	64	
植 土	含む	1,054	971	885	803	716	634	548	465	379	296	210	128	41	C
	含む 富む	1,268	1,168	1,065	964	863	761	660	559	458	356	255	154	53	
	すこぶる富む	1,830	1,684	1,538	1,391	1,245	1,099	953	806	660	514	368	221	75	
腐植土		2,063	1,898	1,733	1,568	1,403	1,238	1,073	908	743	570	413	248	83	H

注 1：消石灰施用の場合は 0.75 を乗じた量を施用する。

注 2：火山灰土の場合は普通土壌よりも比重が軽いので、この量より 30% 内外を減じたほうが良い。

施肥診断技術者ハンドブック，J A 全農肥料農薬部 1999，p.195 より

例：腐植含量「含む(2~5%)」の壤土の pH を、pH 5 から pH 6 へ 1 上げる場合、

炭カル必要量 = 379 - 128 = 251 (kg/10a)

兵庫県下の農用地土壌には腐植含量 2~5% のものが多い (図 3-1(2) の 6 参照)。

(I) 土壌 pH が作物の適正值より高い場合

施設土壌では塩類集積により土壌がアルカリ化しやすい。本来は定期的な土壌診断等により顕著なアルカリ化を未然に防ぐべきであるが、アルカリ化が進んでしまった土壌では土壌 pH を下げる必要がある。

- ・土壌の pH, EC がともに高い場合には、まずアルカリ資材の施用を中止する。また生理的酸性肥料 (硫安、塩安など) の使用を検討する。
- ・比較的短期間に土壌 pH を矯正するには、pH を下げる改良資材や硫黄華 (硫黄の粉末。酸化され、硫酸になってから効果が発現する) を施用する (表 3-1(2) の 4)。その効果は製品や土壌の種類により異なるため、前記の中和石灰量の算出方法と同様、各土壌における資材施用量と pH の低下程度との関係を事前にチェックすることが望ましい。

a 硫酸の散布

ポリ容器に多量の水(180倍程度の希釈量)を準備し、濃硫酸を静かに注ぐ(逆の注加は危険・厳禁)。発熱が止まったらジョウロ等で均一に散布・土壌混和し、しばらくしてからpHを確認する。硫酸は劇物であり、トラクタ等を傷めるおそれもあるため、一般生産者には推奨できない。

b 硫黄華の施用

表3-4を参考に所定の硫黄華を均一に散布し、土壌とよく混和する。硫黄華は微生物作用により酸化され、硫酸になってからpHが低下するので、効果の発現には春から夏の期間でも2~3ヵ月を要する。

c ピートモスの施用

ピートモスは有機酸を含みpHが3程度と低いので、酸度無調整のものはpH降下材として使用できる。多量に施用しないと効果が現れにくく、大面積の施用には向かないが、培養土の調整等に利用されている。

d 深耕、天地返し等

下層土のpHが低い場合には有効である。

表 3-4 土壌 pH を 1 下げるのに要する資材量の目安 (1 m²当たり)

土壌の種類	硫黄華	濃硫酸
埴土 (仮比重 0.9)	90 g	270 mL
砂土 (仮比重 1.3)	42 g	123 mL
泥炭土 (仮比重 0.4) <参考>	600 g	1,750 mL

* 濃硫酸 (18M=36N) は 0.1M (0.05N) 程度に水で希釈して使用する。
安全のため、希釈方法は本文を参照。

農水省HPの「Ⅲ 土壌の改良方法」より一部改変。

(オ) 土壌 EC が高い場合の具体的対策

→ 施設土壌の改良対策 (除塩対策) p.51 を参照。内容の多くは露地圃場にも適用可能。

作物別の好適 pH

以下、表 3-5a, 3-5b に一般的とされる品目別の適 pH を示す。
野菜類の適 pH は p. 45 (表 2-22) 参照。

表 3-5 a 麦類, 豆類, 飼料作物等の適 pH

作物名	好適pH	作物名	好適pH
小麦	6.0～7.5	イタリアンライグラス	6.0～6.5
大麦	6.5～8.0	オーチャートグラス	5.5～6.5
ライ麦	5.5～7.0	チモシー	5.5～7.0
エン麦	5.5～7.0	トールフェスク	5.0～6.0
大豆	5.5～7.0	ソルガム	5.5～7.0
小豆	6.0～6.5	アカクローバ	6.0～7.5
トウモロコシ	5.5～7.5	シロクローバ	6.0～7.2
ソバ	5.0～7.0	アルファルファ	6.0～8.0

表 3-5 b 茶, 桑, 果樹の適 pH

作物名	好適pH	作物名	好適pH
茶	4.5～6.5	かき	5.5～6.8
くわ	5.0～6.5	ぶどう	6.0～7.0
かんきつ類	5.5～6.5	いちじく	6.0～6.8
なし	5.5～6.5	くり	5.0～5.5
りんご	5.5～6.0	ブルーベリー	4.0～5.0
もも	5.5～6.0		

注) 地力増進基本指針(1984年9月),

果樹園の土壌診断基準(果樹試験場1985)等より作成。

土壤診断の基準値

以下、表 3-6 に、圃場区分による一般的な土壤の維持すべき目標値を記す。

表 3-6 土壤診断の基準値（維持すべき目標値）

項目	区分	水田 (水稲)	畑（転換畑の園芸作物も含む）		樹園地
			露地	施設	
作土の厚さ(耕起後) (cm)		15～18	20以上	25以上	—
主要根群域のち密度 (mm)		—	10以下	10以下	15～20
有効土層 (cm)		50以上	40以上	40以上	60以上
地下水位 (cm)		—	60以下	60以下	80以下
pH (H ₂ O)		6.0～6.5	6.0～7.0	6.0～7.0	6.0～6.5
陽イオン交換容量(CEC) (me/100g)		12以上	12以上	15以上	12以上
塩基飽和度 (%)		70～90	70～90	70～100	70～90
交換性塩基類 (mg/100g)	石灰 (CaO)	200～250	200～250	250～300	200～250
	苦土 (MgO)	25～35	25～35	35～50	25～35
	カリ (K ₂ O)	20～30	20～30	30～50	20～30
石灰/苦土 (当量比)		3～6	3～6	3～6	3～6
可給態リン酸 (P ₂ O ₅) (mg/100g)		10～30	30～50	50～100	30～50
可給態ケイ酸 (SiO ₂) (mg/100g)		25	—	—	—
遊離酸化鉄 (Fe ₂ O ₃) (%)		0.8以上	—	—	—
腐植 (土壤有機物) (%)		3～5	3～5	3～5	3～5

注1) 有効土層は通常、礫層や地下水位が出現せず、根の伸長を妨げない深さとされる。土壤硬度29 mm以上かつ厚さ10 cm以上の土層がない、との条件が追加されることもあるが、土壤硬度は土壤の水分状態等により変わりやすいことに留意する。

注2) 可給態リン酸はトルオーグ法による。グライ土の水田では10 mg でも問題はない（鉄の還元により鉄型リン酸が可給化しやすい）。

注3) 可給態ケイ酸はいくつかの測定法が提案されており、目的に応じて使い分ける（p.142参照）。測定法により数値は大きく変化するため、必ず方法を明記する。ここにはデータの蓄積の多いpH4酢酸緩衝液法による、本県での目標値を記した。

オ 陽イオン交換容量 (Cation Exchange Capacity, CEC)

(7) CECの基礎と概要

土壌が陽イオンを吸着できる最大量（土壌の陰荷電の総量）を示す数値。土壌中の粘土や腐植は電氣的にマイナスの性質をもち、陽イオンであるカルシウム、マグネシウム、カリウム、アンモニウムイオン等を吸着する。その交換保持される強さは、一般的に以下の順序を示すことが多い。

[$H^+ > Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^+ > K^+ > Na^+$] 。

CECの単位は乾土100 gあたりのミリグラム当量(me/100g)として示し、数値が大きいほど保肥力が高い土壌とされる。ただし黒ボク土の場合は、pH依存性の変異荷電が主のため、CECの値は大きい吸着力は弱く、雨水により陽イオンが流亡しやすい（pHが下がるとCECも下がる）。

【CECに関する留意事項】

- ・一般的なCECの目標値は12～15 me/100g以上であるが（本指針の各表参照）、実際には土質等により矯正が困難な場合も多い。それらを考慮した場合のCECの改良目標は、非黒ボク土で12 me/100g以上（ただし中粗粒質土壌では8 me/100g以上）、黒ボク土で15 me/100g以上、岩屑土や砂丘未熟土で10 me/100g以上とされる（地力増進法基本指針）。
- ・meはmeqとも書き、ミリイクイバレンスと読む。
- ・CECの近年の単位としては $cmol_c/kg$ （センチモルチャージ・キログラム）や $cmol(+)/kg$ も使用されるが、同じ数値のまま読み替えができる（1 me/100g = 1 $cmol_c/kg$ ）。
- ・土壌にはpH依存性のプラス電荷による陰イオン交換容量(Anion Exchange Capacity, AEC)もある。しかし黒ボク土（火山灰土）を除くとその影響はごく小さい。

(4) CECと塩基飽和度

CECは土壌の塩基飽和度（CECの何%が交換性陽イオンで満たされているか）の算出に必須である。塩基飽和度は塩基を保持できる土壌の余力の手がかりとなるほか、一般的にその数値が大きいと土壌pHが高く、小さいとpHが低くなることから、栽培環境の重要な指標の一つとなっている（表3-1(2)の7）。計算は次式による。

$$\text{塩基飽和度 (\%)} = (\text{交換性陽イオン総量 (me)} / \text{CEC (me)}) \times 100$$

CECの測定は繁雑であるが（後述）、県下の土壌については調査データが蓄積されている。それによると通常の腐植含量（2～5%）では10～15 me/100g前後のことが多く、粘質な軽埴土など（土粒子が小さく表面積が大きい）では数値が若干高くなる。また腐植含量が高くなると概してCECも高くなる（以上、図3-7）。

表 3-7 一般的に望ましい塩基飽和度

	塩基等	塩基飽和度 (%)		
		下限	好適	上限
塩基	CaO	35	40	50
	MgO	7	15	20
	K ₂ O	3	5	10
	合計	45	60	80
塩基バランス (me比)	CaO/MgO	5	3	3
	MgO/K ₂ O	2	3	2

施肥診断技術者ハンドブック, JA全農肥料農薬部1999, p. 39
より一部改変

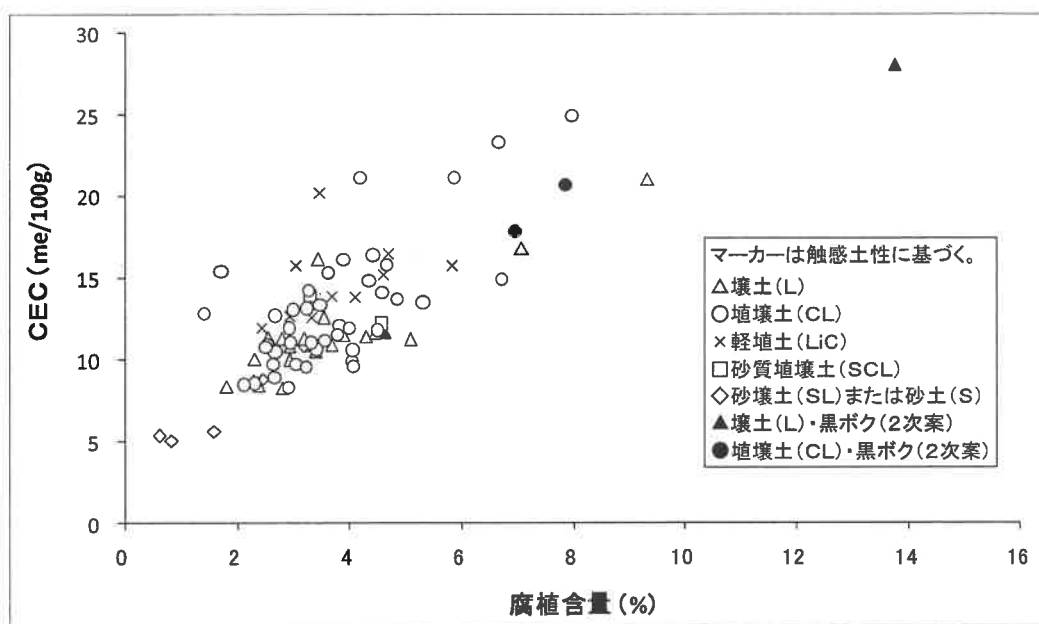


図3-7

兵庫県下の農用地土壌(作土)におけるCECと腐植含量, 触感土性との関係

平成11~14年度土壌機能モニタリング調査成績書、兵庫農総セ2004より作図。
腐植含量の目安: あり <2%、含む 2~5%、富む 5~10%、すこぶる富む 10~20%、
有機質土層 ≥20%

〈参考〉表層多腐植質黒ボク土(2次分類案, 調査事例2):
腐植含量31~35%、CEC 43~44 me/100g (作図からは省略)。

【塩基飽和度の計算例】

塩基の原子量(または分子量)を原子価で割った値をmgで表したものを1mg当量という。例えばCEC 10 me/100gの土壌100gは、カルシウムイオン(原子量40, 荷電数2)を最大で(40/2)×10=200mg(CaO換算で280mg)保持できる。
注) 土壌肥料分野では成分表示と同様、酸化物換算で示すことが多い。

主な塩基(酸化物換算)の1mg当量はCaO 28mg, MgO 20mg, K₂O 47mgである。乾土100g(CEC 20 me/100g)中にCaO 280mg, MgO 80mg, K₂O 94mgが含まれる場合、me数はCaO 10, MgO 4, K₂O 2となり、その合計は16 me、塩基

飽和度は $(16/20) \times 100 = 80\%$ となる。また、石灰/苦土比は $10/4 = 2.5$ 、苦土/カリ比は $4/2 = 2$ となる。

(ウ) 低CEC土壌への対応

塩基飽和度の適正域とされる60~80%は、主にCECが20~40 me/100gの土壌における試験結果に基づく(出典:図3-8に同じ)。したがって低CECの改善が困難な砂質土壌などでは、塩類濃度障害に注意し、周辺環境に配慮しつつ塩基飽和度を80%以上(さらには100%以上)とした方が作物生育によい場合もある。またCECを高めるには、ゼオライトやベントナイトの施用が有効とされている(効果は通常、ゼオライト>ベントナイト)。ただしこれらの資材の化学的組成は産地や製品により大きく異なるほか、効果の程度や持続性には土壌条件の影響も大きいとみられるため、効果確認は現地試験を基本とする。

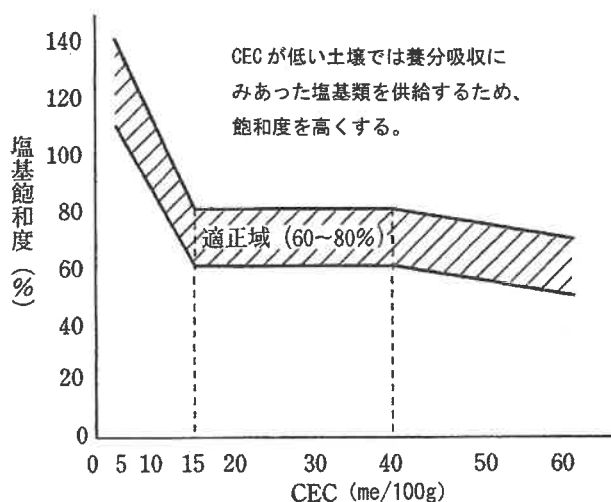


図 3-8

CEC と適正塩基飽和度との関係

土壌診断の方法と活用, 藤原俊六郎・安西徹郎・加藤哲郎著, 農文協 1996, p. 129 より一部改変。

(イ) CECの測定法

一般的なセミマイクロシヨールンベルガー法では、まず土壌の交換性陽イオンを酢酸アンモニウム(酢安)中の NH_4^+ で交換・浸出し、余剰の酢安をエタノール液で洗い流す。ついで土壌に吸着・飽和した NH_4^+ を塩化カリウム液で浸出し、この NH_4^+ をホルモール法や水蒸気蒸留法により定量してCECを算出する。

[操作の一例] *遠心分離器が使用できる場合。各種変法もある。

風乾細土2 gをポリエチレン製蓋付遠沈管に採取

→1 M酢安(pH 7.0) 25 mLを注加し、1時間振とう

→遠心分離し、上澄液を捨て(または交換性塩基の分析用に保存)、

残さに80%エタノール液(pH 7.0) 20 mLを注加

→振とうして残さを分散させ、遠心分離のち上澄みを捨てる

→同様のエタノール液による洗浄を計3回行う

→残さに10%塩化カリウム(pH 7.0) 25 mLを注加して分散させ、1時間振とう

→ろ過のち、ろ液をホルモール法によりTB指示薬を用いて0.02 M NaOHで滴定し、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)の量を定量

【CECの測定に関する留意事項】

- ・ 酢安液とエタノール液の濃度「1 M」と「pH 7」は正確に調整する（測定への影響が大きい）。
- ・ NH_4^+ の滴定に用いるNaOHは、空気中の CO_2 を吸収して力価が変わりやすいので注意すること。

(3) 土壌の生物性

これまでの土壌診断は化学性、物理性が中心であり、生物性については未知の部分が多かった。近年、連作障害など土壌の生物性の悪化による問題が増えており、土壌の生物性が注目されてきている。

ア 土壌生物の種類

土壌中には多種多様な生物がすんでおり、それぞれの生活過程を通じてさまざまな物質変換に関わっている。農業の場面においても腐植の集積、窒素固定、作物養分の供給など有益な側面と、動物による食害、虫害、土壌病害、脱窒、硫酸還元作用による水稻根の根腐れなど有害な側面がある。主要な土壌生物の種類と特徴を表3-8に示す。

表3-8 土壌生物の種類と特徴

種類	特徴
土壌動物	<p>1) ミミズ：土壌とともに植物遺体を食べ分解する。ミミズの活発な活動は土壌の通気性を改善するとともに腐熟化促進の効果がある。好気性で土壌が圧密されると少なくなる。酸性に弱くpH4.5以下では見られない。</p> <p>2) センチュウ類：草食性で植物根に寄生するものや捕食性でほかの土壌動物などを食べて生育するものもいる。深さ5～10cmの根圏に多く分布する。</p> <p>3) トビムシ・ダニ類：腐植層の上部に生息し、粗大有機物や糸状菌の菌糸を食べ分解する。土壌腐植の生成に役立っている。</p> <p>4) 原生動物：土壌動物の中では最も数が多く、土壌粒子を取り囲む薄い水膜中で生息する。多くは捕食性で細菌などを食べる。</p>
藻類	<p>クロロフィルなどの色素を持ち、光エネルギーを利用できる光合成的無機栄養生物を藻類として分類している。土壌中の藻類は、けい藻、緑藻、らん藻が主で、水田土壌に多い。らん藻類の中には窒素固定能を持ったものがある。</p>
糸状菌	<p>カビやキノコのような菌糸を作る菌類で、担子菌類(キノコ類)も含まれる。外見の大部分は糸状の「菌糸」と菌糸から伸びる「分生子柄」とその先にできる「分生胞子」からなる。有機物分解の中心的役割を担っており、粗大有機物の骨格となるセルロースやリグニンを分解し、そのあとの細菌による分解を促進する。好気性で畑地土壌に多く、水田土壌では比較的少ない。</p>
放線菌	<p>細菌と糸状菌の中間的な性質を持つ微生物で、偽菌糸を作るものが多い。各種の抗生物質を生産するものや特有のにおい(土の独特のにおい)を出すものがある。病原性を持つものもあるが、多くは腐植の生成や分解、土壌病原菌増殖抑制などで有益な働きをしている。</p>
細菌	<p>バクテリアともいい、土壌生物の中では最も小さく形状としては球菌、桿菌、らせん状のものがある。大きさは0.5μm～4μm程度で鞭毛、線毛をもつものもある。さまざまな有機物および無機物をエネルギー源として利用し、環境中の酸化還元、物質循環に寄与している。</p>

イ 土壌生物の生態と働き

土壌生物の量は、一般的な畑土壌では生菌体で10a当たり約700kg、乾燥菌体で約140kg存在すると言われている。このうち70～75%が糸状菌、20～25%を細菌が占め、土壌動物は通常5%以下である。菌数は糸状菌より細菌が多いが、生体重では糸状菌の割合が大きい。

畑と水田では存在する土壌微生物の種類が異なる。水田では土壌が酸素の少ない嫌気条件下となるので、嫌気条件下で活動できる細菌が大部分を占め、酸素を多く必要とする糸状菌は少ない。また、田面水には微小藻類や原生動物が多い。

畑は水分が少ないので、微小藻類や原生動物が少なく、糸状菌と細菌が大部分を占めるが、乾燥に強い糸状菌の割合が最も大きい。

(7) さまざまな土壌微生物

多くの土壌微生物の中には、農業上大変重要な働きを持ったものがある。

a アンモニア化成菌

有機物を分解し、アンモニア態窒素を放出する菌群の総称で、土壌にすむ多くの糸状菌、放線菌、細菌など有機栄養微生物がそれにあたる。

b 硝酸化成菌（アンモニア酸化細菌、亜硝酸酸化細菌）

土壌中のアンモニア態窒素を亜硝酸に変える働きを持つ菌群をアンモニア酸化細菌、亜硝酸を硝酸に変える働きを持つ菌群を亜硝酸酸化細菌という。畑状態では2週間程度でアンモニアから亜硝酸を経て硝酸が生成する。通常は、アンモニアから亜硝酸が生成されると速やかに硝酸に酸化される。

c 脱窒菌

土壌中の硝酸態窒素が嫌气的条件下で還元され、窒素ガスとなって空气中に揮散する反応を「脱窒」といい、この反応に関与する微生物の一群を脱窒菌という。酸化還元電位が250mV程度に下がると脱窒反応が開始する。なお、通気状態やpHなどによっては亜酸化窒素が生ずることがある。

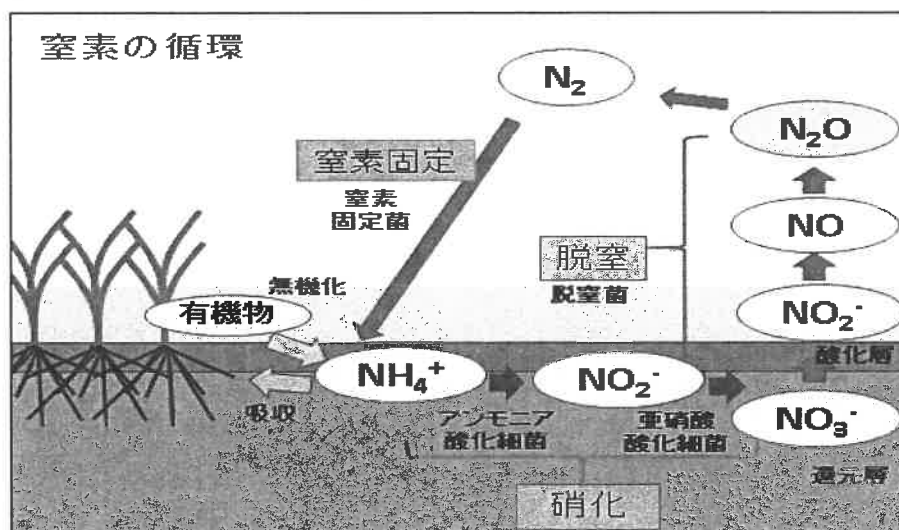


図3-9 窒素循環の模式図

窒素固定菌、硝酸化成菌、脱窒菌などが窒素循環に関与している

d 鉄酸化菌

強酸性下(pH 2～3)で2価鉄を3価鉄に酸化し、その時に発生するエネルギーを利用して活動する菌。pHが中性に近い時はこの反応は化学的に進行するが、強酸性下では微生物が担っている。

e 鉄還元菌

水田において湛水条件下で3価鉄は有機物の存在下で2価鉄に還元される。この過程に関与する微生物を鉄還元菌という。

f 硫酸還元菌

嫌気条件下で硫酸根を硫化水素まで還元する反応に関与する。水田では稲の根に有害な硫化水素を発生させるため、有害菌として認識されている。未熟有機物の施用で活動が促進される。硫化水素の害を防止するには、無硫酸根肥料の利用、鉄分の補給、完熟堆肥の施用などが必要である。

g 硫黄細菌

硫黄や無機硫黄化合物を酸化し、そのエネルギーを利用して炭酸同化作用を行う菌群の総称である。土壌中や淡水、海水中に広く分布する。硫酸還元菌と逆のはたらきをし、自然界で硫黄の循環サイクルに関与している。

h 光合成細菌

細菌のうち体内にクロロフィルもしくはバクテリオクロロフィルを持ち、光エネルギーを利用して生育するものを光合成細菌といい、その大半は窒素固定能を持つ。

i 窒素固定菌

空気中の窒素をアンモニアに変化させ、自己の生育に必要なアミノ酸やタンパク質を合成できる微生物の総称。窒素固定を触媒する酵素ニトロゲナーゼは酸素により活性を阻害されるため、窒素固定は一般的に嫌気条件下で行われる。窒素固定菌には下のような種類がある。

(a) 根粒菌

植物の根に入り、根粒を作って共生する微生物で、マメ科の根粒菌がよく知られている。根粒菌は好気性微生物であるが根粒中で赤色を示すレグヘモグロビンが窒素固定系を酸素から保護している。根粒は乾燥、過湿ともに弱い。

そのほかハンノキなどの木本類からも根粒が発見されている。

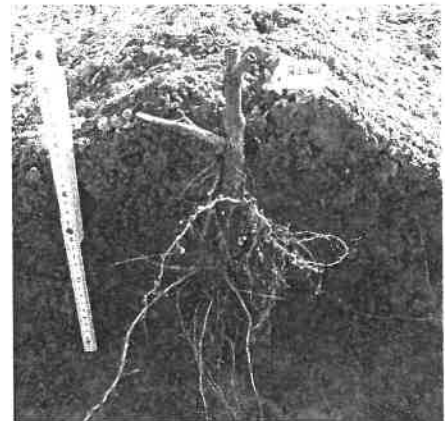


写真3-1 黒大豆の根粒

(b) らん藻類

ノストックとアナベナの2属が確認されており、無機栄養生物であるが、いずれも他の植物と共生することができる。アナベナは水生シダのアズラ(アカウキクサ)と共生し、高い窒素固定能力を有するため水田での利用が研究されている。

ウ 連作障害

連作障害とは同じ種類の作物を同じ畑に連作したときに、連作に伴ってその作物の収量・品質が低下する現象である。作物が連作されると、その植物体に侵入できる菌が植物体内で増殖し、残渣内で生き残り、そこから新しい植物体に感染して増殖するというサイクルを繰り返して病原菌が集積していく。

作物の収量・品質低下の要因として連作障害が問題となった背景には次のような営農体系、土壤環境条件の変化があげられる。

- (ア) 単一作物が連作されるようになってきたこと
- (イ) 肥料の過剰投入などによる養分バランスの崩れや有機物の不足による地力低下など作物が健全に生育しにくい土壤環境のほ場が多くなってきて、病原菌に対する抵抗力が弱まってきたこと
- (ウ) 水田転作が推進される中で病原菌が繁殖しやすい排水不良ほ場でも野菜等を栽培される場合が増えてきたこと
- (エ) 大型農業機械の普及で踏圧による耕盤ができ、根張りの悪いほ場が多くなってきているとともに、機械に付着した土壤によって病気の伝搬が加速したこと
- (オ) 病原菌側でも作型の多様化や品種の変化等に対応して、新しい環境条件にも適応できる病原菌が出現してきたこと

エ 土壤病害のタイプと病原菌

土壤微生物の中には、植物の防御機構を突破して植物体内に侵入し、増殖して病気を起こす菌がいる。土壤伝染性病害の種類は、柔組織病、導管病、肥大病に分けられる。

柔組織病は、地下部の茎、根などに感染した病原菌で、組織が壊死（ネクロシス）を起こす。導管病は根などから感染した病原菌が導管で増殖し、導管の閉塞などで水の上昇が妨げられ、地上部が萎凋する。肥大病は感染組織の細胞が異常に分裂、肥大するためこぶ状の肥大を起こす。

これらの病気を起こす土壤伝染性病原菌の種類には糸状菌、細菌、放線菌、ウイルスがあるが、中でも糸状菌による病気が70～80%を占めている。

オ 土壤病害の発生と土壤の化学性

肥料養分の過剰施肥による根へのストレスなどで、病原菌の感染が起こりやすくなる。また、根粒菌などの共生菌、有用微生物の感染阻害と多様性の貧弱化、植物体内の共生菌の減少と多様性減少、軟弱徒長による病害抵抗性の減少が生じることがある。

土壤の化学性については特に pH と土壤病害の発生について関連が深い。糸状菌による病害は概して酸性で多発し、アルカリ側では少なくなる傾向がある。糸状菌の病気でもアブラナ科の根こぶ病は pH の影響が大きく、pH を 7.2～7.4 に調整することにより遊走子の鞭毛が動けなくなり感染しにくいとされている。土壤 pH が極端にアルカリ側になるとモリブデン以外の微量要素が不可給態化し、微量要素欠乏が発生しやすくなるので、注意が必要である。ジャガイモのそうか

病はアルカリ性で発病が激しくなるので、pHを5.5～6.0に調整する。

また、窒素やリン酸の過剰でも病気に罹りやすくなるため、適正な施肥が必要である。

カ 土壤病害の発生と土壤の物理性

土壤微生物の活動には土壤中の水分、酸素の多少、耕盤形成などの物理性も影響する。水分が多く、水田など酸素の少ない嫌气的条件では嫌気性細菌が増え、畑地など酸素の多い好气的条件では乾燥に強い糸状菌が優占してくる。ただし、疫病菌、根こぶ病菌など多湿土壤で増殖しやすい糸状菌も存在する。

耕盤が形成されると根張りが浅く、排水不良になりやすい。根張りが浅いと病原菌の菌数が同じであっても、病原菌に侵される割合が高く被害が大きくなる。また、耕盤形成により排水不良で多湿になると、多湿条件を好む病原菌が増殖しやすくなるとともに、根腐れを起こして作物の抵抗力が低下する。排水不良土壤では暗渠、明渠、高畝などの対策が発病抑制につながる。

団粒構造が発達した土壤は透水性、通気性、保水性に優れ作物の生育に適した土になるが、団粒形成には土壤微生物が関与している。微生物の生産した粘質物質が粘土粒子、腐植、細菌細胞などを結合させ、微小団粒を形成している。団粒構造が発達すると様々な直径の孔げきが存在し、これが多様な微生物の共存を可能としている。

キ 各種有機質資材と土壤微生物の種類

一般的に有機質資材の組成と土壤微生物相との関係は、粗脂肪、可溶性無機窒素物、カリウム、炭素が多く、C/N比が高い資材は糸状菌が増殖しやすく、灰分、リン酸、石灰が多い資材は放線菌が増殖しやすく、タンパク質が多い資材は細菌の増殖が著しい。

有機質肥料をはじめとした有機質資材や無機資材が土壤微生物相に与える影響を分類すると次のとおりとなる。

- (ア) 硫安などの無機肥料、ゼオライトなどの無機資材、オガクズなどの易分解性物質が少ない有機物は微生物数に大きな影響は与えない。
- (イ) 魚かす、蒸製毛粉などの動物質肥料、なたね油かす、米ぬかなどの植物質肥料、もみ殻、コーヒーかすなどの植物質資材は糸状菌の増加が著しい。
- (ウ) 蒸製骨粉、鶏ふんなどは、糸状菌、細菌、放線菌が比較的均等に増加する。
- (エ) カニがら、ハム・乳製品工場活性汚泥、ニカワ、ゼラチンなどのタンパク質、消石灰などのアルカリ資材などは細菌、放線菌の増加が著しい。

ク 微生物資材の活用

作物の健全性を維持するためや生物相の改善を図る資材として微生物資材が販売されている。微生物資材がうたっている効果としては生物性改善、作物の健全化、有機物の分解促進、作物の品質向上などがあるが、微生物資材でうたっている効果が本当に表れるのか、例え効果があったとしても資材中の微生物の効果なのか、添加物、肥料養分の効果なのか不明である場合がある。微生物資材の使用に当たっては、資材中の含有微生物の種類、菌数、担体（米ぬか等の有機物やバーミキュライト、ゼオライト等の多孔質物質）の種類、化学的性状（pH、肥料成分等）、使用法などを把握して、目的に応じて資材の選択をする必要がある。

(4) 作物の必須元素

ア 各元素の働き・生育障害とその回避法

(7) 植物の必須元素

植物の身体は、炭水化物(セルロース、でんぷん、糖など)、たんぱく質、脂肪、ペクチン、リグニン、核酸、リン脂質、アミノ酸、色素などの有機物と水、無機塩類(灰分)から成り立っている。このうち水は植物体の70%以上含まれる。植物体から見出される元素は40種類を超えているが、そのうち植物の生育に不可欠で、欠乏すると生育が抑制され、あるいは停止する元素を必須元素という。

必須元素には表に示す17種類(ケイ素を除く)が知られており、そのうち植物体内に多量に存在し、組織の構成に関わるものを多量要素という。それに対し、植物体内にごく少量存在し、酵素中心や色素などに欠かせないものを微量要素という。各必須元素の生理作用を表に示す。

表3-9 植物の必須元素一覧

要素	多量要素									
元素名 (記号)	水素 (H)	酸素 (O)	炭素 (C)	窒素 (N)	リン (P)	カリ (K)	カルシウム (Ca)	マグネシウム (Mg)	硫黄 (S)	ケイ素 (Si)
要素	微量要素									
元素名 (記号)	鉄 (Fe)	ホウ素 (B)	塩素 (Cl)	銅 (Cu)	マンガン (Mn)	モリブデン (Mo)	亜鉛 (Zn)	ニッケル (Ni)		

a 肥料三要素

植物が必要とする元素のうち、炭素・水素・酸素は大気中の二酸化炭素、あるいは水から供給されるため、通常は肥料として施用することはない。窒素・リン・カリウムは、土壤中で不足することが多く、肥料として施用したときの効果も現れやすいので肥料三要素という。

b 二次要素

カルシウム・マグネシウム・硫黄は、三要素に次いで植物の要求性が高いことから、これを二次要素という(特殊成分ということもある)。

カルシウムは、植物養分として施用するよりは、土壌の酸性矯正のための資材としての役割が大きい。硫黄は植物養分としては重要であるが、肥料要素と随伴して施用されることが多い(硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、硫石灰、硫酸カリウムなど)。また、アルカリ化した土壌のpHを下げるため、硫黄華(いおうか)を施用することがある。

c 微量要素

現在、鉄、ホウ素、塩素、銅、マンガン、モリブデン、亜鉛、ニッケルの8元素が微量要素として認められている。このうち塩素は肥料の随伴成分として施用されることが多く(塩化カリウム、塩化アンモニウムに多い)、また天然供給量も多いことから肥料の主成分としては認められていない。

ホウ素・マンガンは野菜・果樹などで欠乏となる事例が多いので、肥料の主成分として認められている。

d 植物体内で見出されるそのほかの元素

植物体内には必須元素以外に多数の元素が見出される。これらの中には、植物にとっては必須ではないが、動物の栄養には必須な元素がある。

ケイ素は、なくても植物は生育することができるため必須元素としては認められていない。しかし、水稻のように多量のケイ素を含む植物があり(ケイ酸植物)、またケイ素を多く含む水稻は生育にプラスになる(水分生理の変化、受光態勢の改善、耐倒伏性、病害虫に対する抵抗性など)ことから、肥料の主成分として認められ有用要素といわれている。

ナトリウムは動物では必須であり、塩性植物やシュガービートでも必須といわれ、その施用で収量が増加することがある。しかし、すべての植物にとって必須であると証明されていない。動物ではヨウ素、コバルト、セレンも必須であり、クロム、バナジウムなどについても必須性が議論されている。

一方、汚染などによって土壌中などの含量が高まると、植物が吸収する元素があり、カドミウム、ヒ素などがその例としてあげられる。分析法が進歩すると検出される元素の数は増加する。これらは微量元素というが、植物栄養上での意義がまだ不明のものもある。希土類元素の中には植物生育を促進するといわれる元素があり、植物に対する刺激作用が考えられている。

表3-10 植物必須要素一覧（多量要素）

元 素	主な吸収形態	主な生理作用	
炭素 (C)	$\text{CO}_2, \text{HCO}_3^-$	1 全ての有機化合物(炭水化物・タンパク質など)の構成元素。	
		2 大気から二酸化炭素を吸収・同化(光合成作用)。	
		3 最終分解産物として二酸化炭素を生成し呼吸作用により放出。	
水素 (H)	$\text{H}_2\text{O}, \text{H}^+, \text{OH}^-$	1 全ての有機化合物(炭水化物・タンパク質など)の構成元素。	
		2 水をつくり、植物内の生理作用に関与。	
		3 葉緑体内で水を分解してつくられ、合成系に供給される。	
酸素 (O)	$\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{O}_2$	1 炭水化物、タンパク質、脂肪など植物構成成分を構成する元素。	
		2 水、二酸化炭素の構成元素。	
		3 呼吸作用において不可欠。	
三 要 素	窒素 (N)	$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-$	1 タンパク質、核酸、葉緑素、ホルモン物質などの主要植物成分の構成元素。
			2 タンパク質は原形質の主要成分であり、各種酵素として生理作用に関与。核酸は遺伝子を形成し、細胞分裂などにも関与する。
			3 生育を促進し、養分吸収、同化作用などを盛んにする。
リン (P)	$-\text{HPO}_4^{2-}, \text{H}_2\text{PO}_4^-$	1 核酸、酵素などの植物成分の構成元素となり、生理作用に関与し、遺伝子を形成。	
		2 光合成、呼吸作用、糖代謝などの中間産物をつくる。	
		3 ATP、ADPをつくり、植物体内のエネルギー代謝の中心的な役割を果たす。	
カリウム (K)	K^+	4 植物の生長、分けつ、根の伸長、開花・結実を促進する。	
		1 浸透圧の調節、pHの安定化に関与	
		2 多くの酵素の活性化、膜透過、気孔の開閉に関与	
二 次 要 素	カルシウム (Ca)	Ca^{2+}	3 細胞の膨圧維持により水分調節に関与(冷害抵抗性を高める)。
			4 硝酸の吸収、体内での還元、タンパク質の合成に関与。
			5 光合成産物の果実や根への転流を促進する。日照不足時などに施用効果大きい。
マグネシウム (Mg)	Mg^{2+}	1 ペクチン酸と結合し、植物細胞壁の形成と強化に関与。	
		2 有機酸などの有害物質の生体内での中和。炭水化物の代謝にも必要といわれる。	
		3 根の生長を促進する。不足すると、トマトの尻ぐされなど特有の欠乏症状を発現。	
硫黄 (S)	SO_4^{2-}	1 葉緑素の構成元素であり、光合成に関与。	
		2 炭水化物、リン酸代謝などに関与する多くの酵素の活性化に関与。一部の酵素を構成。	
		3 リン酸の吸収、体内移動に関与する。	
タンパク質	窒素	$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-$	4 欠乏すると葉脈間が黄化する。
			1 タンパク質、アミノ酸(シスチン、メチオニンなど)、ビタミンなどの構成元素。植物体内での酸化・還元、生長の調整などの生理作用に関与。
			2 植物の特殊成分(からしのからみ成分であるシニグリンなど)を形成する。
葉緑素	窒素	$\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-$	3 葉緑素の生成、炭水化物の代謝に間接的に関与。

表 3-11 植物必須要素一覧（微量要素、有用要素）

元 素	主な吸収形態	主な生理作用	
微量要素	鉄 (Fe)	Fe^{2+}, Fe^{3+}	<ol style="list-style-type: none"> 1 鉄ポルフィリン(ヘムタンパク質)として、チトクローム、カタラーゼなどの酵素をつくり、体内の酸化還元反応、光合成などに関与。 2 葉緑素の前駆物質であるポルフィリンの合成に関与。 3 植物体内で銅、マンガンなどと拮抗作用をもつ。 4 欠乏すると葉が黄白化(クロロシス)する。
	マンガン (Mn)	Mn^{2+}	<ol style="list-style-type: none"> 1 葉緑素の形成に関与し、光合成過程における水の光分解と酸素の発生に関与。 2 酸化還元酵素の活性化に関与。 3 ビタミンCの合成に関与。
	ホウ素 (B)	$H_2BO_3^-$	<ol style="list-style-type: none"> 1 細胞壁生成に重要な役割を持つ。リグニン、ペクチンの形成に関与し、細胞膜や通導組織を形成・維持する働きがある。 2 水分・炭水化物・窒素の代謝に関係し、酵素を活性化する。糖の移行に関与する。 3 花粉の発芽や花粉管の育成に関与し、欠乏すると不稔になる。 4 動物・微生物では必須ではない。
	亜鉛 (Zn)	Zn^{2+}	<ol style="list-style-type: none"> 1 葉緑素、β-インドール酢酸(IAA)の生成に関係。欠乏すると節間が伸長しなくなり、叢状になるのも、IAAの生成または分解に関係するためである。 2 オーキシンの前駆物質トリプトファンの生成に関与。 3 各種の酵素の構成元素または賦活剤になる。鉄、マンガンと拮抗。 4 細胞の水分平衡にも関係し、欠乏すると吸水が増加し、細胞の浸透圧が高くなる。
	銅 (Cu)	Cu^+, Cu^{2+}	<ol style="list-style-type: none"> 1 チトクローム a、アスコルビン酸酸化酵素、チロシナーゼ、ラッカーゼなどを構成。 2 葉緑素の形成、タンパク質の代謝、傷の保護作用などに関与。 3 鉄、亜鉛、マンガン、モリブデンと相互作用がある。銅過剰は鉄の吸収・移行を阻害。
	モリブデン (Mo)	MoO_4^{2-}	<ol style="list-style-type: none"> 1 硝酸還元酵素、ある種の酸化還元酵素を構成。 2 根粒菌による窒素固定に関与。 3 ビタミンCの生成に関与。
	塩素 (Cl)	Cl^-	<ol style="list-style-type: none"> 1 光合成の際の水分解に関与。 2 アミラーゼの活性化など、デンプン、セルロース、リグニンなどの植物体内構成成分の合成に関与。
	ニッケル	Ni_2^+	<ol style="list-style-type: none"> 1 尿素をアンモニアに分解する酵素ウレアーゼの構成元素。 2 植物体内で発生する尿素の代謝、再利用に関与。
有用要素	ケイ素 (Si)	$H_3SiO_4^-$, 低分子のコロイド状ケイ酸	<ol style="list-style-type: none"> 1 イネ科植物、特に水稻の葉にケイ化細胞が増加し、組織の強化(耐倒状性)、耐病虫害性を付与する。 2 葉からの水の蒸散を抑制し、水分代謝を調節。

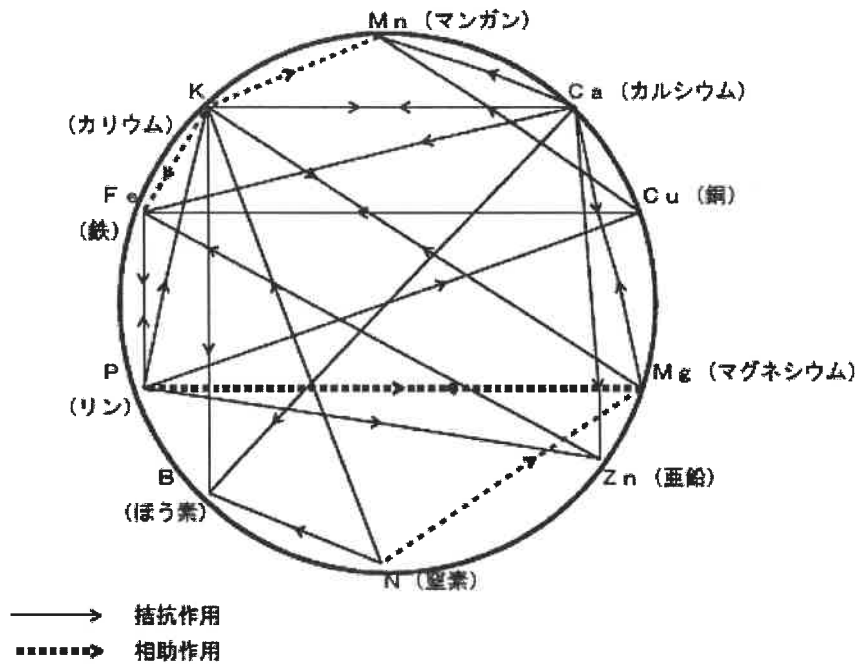


図3-10 要素の相互作用 (Schutte 1964)

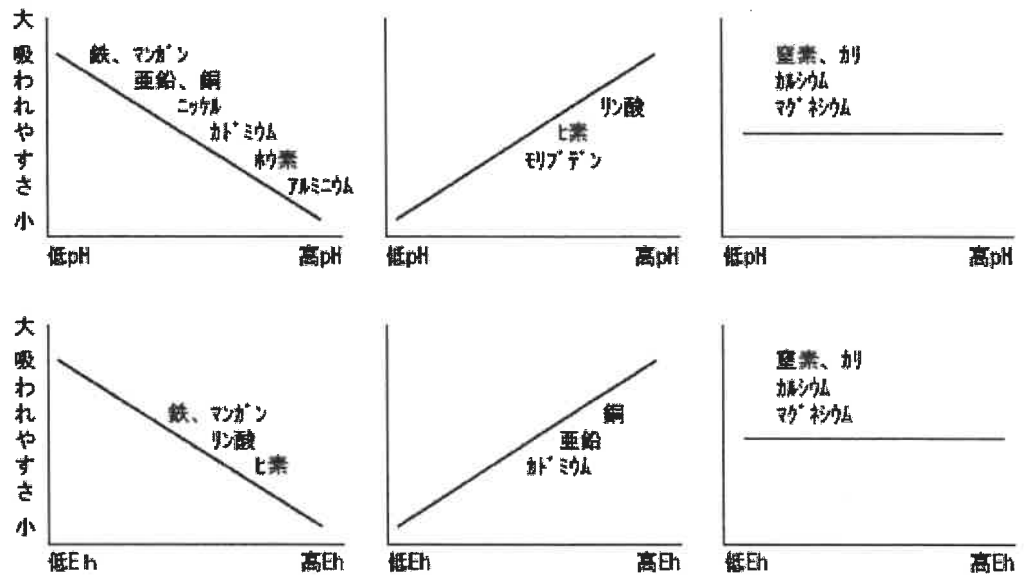


図3-11 土壌診断2つのポイント、pH・Ehと各元素の作物への吸われやすさ

(pHの高低は、通常作物が栽培されている範囲で4~8程度、Ehは、水稻栽培も考慮した範囲で+600~-200 V程度)

Eh (酸化還元電位) とは、酸化状態 (酸素が多い状態) および還元状態 (酸素が少ない状態) をあらわす指標で、ミリボルト (mV) で示す。Ehは酸化状態で高く、還元状態では低くなる。

(イ) 生理障害診断技術

a 生理障害とその原因

農業の高度化により、開墾地でみられるような単純な元素の欠乏、過剰症が少なくなっているが、分類すると現場で問題となる障害は以下のように分けられる。

- ・栄養障害
- ・病害虫による障害
- ・薬剤による障害
- ・環境異常による障害

最近問題となっている生理障害の原因は、元素の欠乏・過剰症ともに外因、誘因、内因の各要因が複雑に絡み合い、一つに限定することは難しい。各要因を整理すると以下のとおりである。

表3-11 外因（主として作物の外に位置する要因で、物質として障害発生に関与するもの）

土壌及び養液等培地の化学性に起因	pHの異常、高塩類濃度、各種養分の欠乏・過剰、有害元素の存在、異常還元
土壌の物理性に起因	過乾、過湿、通気性不良、高ち密度、浅耕土
薬剤に起因	殺菌、殺虫剤の使用ミス、ホルモン剤の障害、除草剤の残留
農業用資材・装置に起因	未熟堆肥、ビニール可塑剤、暖房機の不完全燃焼
環境汚染に起因	亜硫酸ガス、オゾン、フッ化水素、大気汚染物質、窒素化合物、重金属元素、有害有機化合物

表3-12 誘因（主として自然条件に起因し、外因の作物への働きかけを助長するもの）

気象環境に起因	低日照、日中と夜間温度の異常格差、少雨、長雨、晩霜
土壌基盤に起因	地形、土壌型

表3-13 内因（主として作物の内に位置する要因で、障害発生程度に関与）

品種に起因	生理障害の発生しやすい品種、接ぎ木・台木の不親和性
栽培方式に起因	不適正な作型、栽植密度、不備な整枝、せん定、摘果

b 診断手順

土壌肥料面から土壌や作物体の分析ばかりしていると、障害が発生した際に、すべてが土壌肥料的要因によるものと考えてしまう傾向がある。そこで、大切なのは栽培履歴の確認等を含めたほ場観察である。

(a) ほ場での発生状況

① 病害

同一ほ場内における障害に集団性が認められたり、各作物個体の障害程度に顕著な差が認められる。症状が時間の経過とともにひどくなったり、降雨、曇天の続いた後に急速に蔓延したりする場合は、伝染性病害の疑いがある。

② 栄養障害等

一ほ場に均一に同じような障害が生じているときは、肥料成分の欠乏、過剰またはバランスの崩れによる栄養障害、除草剂等薬剤の害による障害と考えられる。

③ 気象災害等

多種類の作物または特定の作物が同時に同じような症状を示す場合は、冷害、風害等の気象災害または煙害などの公害が考えられる。

(b) 養分の欠乏、過剰症状の特徴

① 萎凋(しおれ)症状は示さない

土壌の水分不足、病害虫被害、過湿による根ぐされなどと異なり、元素の欠乏や過剰症が原因でしおれを示すことは少ない。

② 伝染性がない

葉と葉が接触してその障害が伝染することはない。

③ 異臭がしない

野菜類の軟腐病、チューリップの球根腐敗病(エステル臭)等病害部位は一般に異臭がすることが多いが、元素の欠乏、過剰症が原因で臭いがすることは少ない。

例外としてCa欠乏も一因とされているメロンの発酵果は臭いがある。

④ 障害部位は湿潤状態を示すことは少ない

元素の欠乏、過剰症が原因による障害部分の水分は、正常な組織と同じか、乾燥気味である。

⑤ 導管はあまり褐変しない

ほ場現場で観察される元素の欠乏、過剰症で導管が褐変することはほとんどない。例外として、だいこんのホウ素の欠乏症に認められる程度である。

⑥ 作物体の半身だけが障害を示すことは少ない

ナスの半身萎凋病、いちごの萎黄病などは半身だけが黄化したり、片側だけが奇形になることがある。しかし、元素の欠乏、過剰症では半身だけが異常を示すことは少ない。

(c) 元素の欠乏、過剰症と誤りやすい害虫被害

最近、生長点の奇形、発育不良等の萎縮症状の農家からの持ち込みが多く、生理障害及びホルモン障害ではないかと疑われる場合が多い。しかし、よく観察するとダニ類の虫害による場合も非常に多い。以下に元素の過不足と虫害のまぎらわしい例を示す。

表3-14 障害の部位や症状から予想される生理障害・害虫

障害部位	症 状	予想される元素の過不足	予想される害虫
生長点	心どまり	ホウ素(B)欠乏	ヒラズネヒゲボゾウムシ (ヒバ、スギ類)
	心どまり ・奇形	ホウ素(B)欠乏、 ホルモン障害	チャノホコリダニ (ピーマン、ナス、いんげん)
	ちぢれ		アブラムシ
	奇形・発育 不良	石灰(Ca)欠乏	ケナガコナダニ (すいか、ナス、はくさい、 ミズナ)
	萎縮	石灰(Ca)・ホウ素(B)欠乏	メセンチュウ (いちご)
花	色抜け	ホウ素(B)欠乏	チューリップサビダニ
葉	葉脈間の黄化	苦土(Mg)欠乏	ハダニ
	ひきつれ・反り 返り・ひだ葉	ホルモン障害	ネギアザミウマ (こまつな)
根	肌荒れ	ホウ素(B)欠乏	ネグサレセンチュウ

表3-15 元素の欠乏・過剰障害の地上部の典型的症状

症 状		欠乏元素	過剰元素
クロロシス を生じる	上位葉 から	鉄(Fe)・硫黄(S)・ [亜鉛(Zn)・マンガン(Mn)・ 銅(Cu)]	銅(Cu)・亜鉛(Zn)・ニッケル(Ni)・ マンガン(Mn)・カドミウム(Cd)
	下位葉 から	窒素(N)・カリウム(K)・ 苦土(Mg)・[リン酸(P)・亜 鉛(Zn)・マンガン(Mn)・銅 (Cu)]	ホウ素(B)
上位葉の生長停止		ホウ素(B)・石灰(Ca)	
斑点症状	大型	カリウム(K)	
	小型		マンガン(Mn)・ニッケル(Ni)・リン 酸(P)
奇形・亀裂	葉に	モリブデン(Mo)	
	茎に	ホウ素(B)・石灰(Ca)	
葉縁から枯死		カリウム(K)	ホウ素(B)・[リン酸(P)]

注) 表中 [] 内の元素は、症状が現れにくい場合がある。

最近土壌の化学性を分析してみると、野菜産地では養分過剰な土壌が多く見られる。しかし、十分に養分が満たされている土壌で栽培しても、欠乏症状を呈することがある。

例えば、しゅんぎくの心枯れ症は土壌中に十分なCaが存在するのにCa欠乏となっている。これは土壌中にリン酸が過剰に存在するため、Caの吸収が抑制されることに起因している。このように養分が十分存在するほ場では、単なる欠乏・過剰といっても様々な要因が関与し、生理障害の原因究明を困難なものにしている。しかし、このような状況の中でも、土壌に主要因があると予想される生理障害の診断は、作物の良好な生育や健全な土壌を維持するためにはなくてはならないものである。

表3-16 作物別要素欠乏症発現の難易一覧

作物名	N	P	K	Ca	Mg	B	Mn	Fe	Zn	Mo
水 稲	◎	○	○	☆	○	☆	○	○	○	☆
陸 稲	◎	○	○	☆	○	☆	○	◎	○	☆
麦 類	●	◎	◎	☆	●	☆	◎	○	☆	☆
キュウリ	●	○	◎	○	◎	○	☆	○	☆	☆
ト マ ト	◎	○	○	●	●	◎	○	○	☆	○
ナ ス	◎	○	○	☆	●	○	☆	○	☆	☆
ピーマン	◎	○	●	◎	◎	☆	☆	☆	☆	☆
ス イ カ	●	○	◎	○	◎	○	☆	☆	☆	☆
イ チ ゴ	○	○	◎	○	◎	○	☆	☆	☆	☆
キャベツ	◎	○	●	◎	○	○	☆	☆	☆	○
ハクサイ	◎	—	◎	●	●	◎	☆	☆	☆	☆
タマネギ	○	○	○	◎	○	○	☆	☆	☆	☆
レ タ ス	○	—	○	◎	◎	◎	☆	☆	☆	◎
ハウレンソウ	◎	○	◎	●	●	◎	○	○	☆	○
シ ロ ナ	◎	○	○	○	●	○	☆	☆	☆	☆
セルリー	◎	○	◎	○	●	●	☆	☆	☆	☆
ネ ギ	◎	○	○	○	○	☆	○	☆	☆	☆
アスパラガス	◎	○	○	○	◎	◎	☆	☆	☆	☆
カリフラワー	◎	◎	○	○	●	◎	☆	☆	☆	◎
ブロッコリー	◎	◎	○	○	◎	◎	☆	☆	☆	◎
ダイコン	◎	○	◎	○	●	◎	○	☆	☆	○
ニンジン	◎	○	○	☆	◎	○	☆	☆	☆	☆
ジャガイモ	◎	○	●	○	◎	◎	☆	☆	☆	☆
サツマイモ	○	○	◎	○	◎	○	☆	☆	☆	☆
ダイズ	○	○	◎	○	◎	☆	○	☆	☆	☆
ナ タ ネ	○	●	○	○	●	◎	○	○	☆	○
ミカン	○	☆	○	○	●	◎	◎	○	◎	○
リンゴ	○	☆	○	☆	◎	◎	○	☆	○	☆
カキ	○	☆	○	☆	○	☆	☆	☆	☆	☆
ナシ	○	☆	◎	☆	◎	○	○	☆	○	○
ブドウ	○	☆	◎	☆	●	◎	○	☆	○	☆
モモ	○	☆	●	☆	●	○	○	☆	☆	☆
ウメ	○	☆	○	☆	◎	○	○	☆	☆	☆

●非常におこりやすい ◎おこりやすい ○おこる ☆ほとんどおこらない (高橋・吉野・前田,1980)

第4章 参考資料

第1 現場で活用できる分析測定法

(1) 三相分布

ア 三相分布の概要と実容積の測定

三相分布は土壌の固相、液相、気相をさし、その比率は土壌・根圏環境（排水性・保水性・微生物活動等）のうえで重要である。採土管にとった土壌から土壌三相計を用い、実容積（固相、液相の容積の合計＝気相以外の部分）を測定できる。また土壌を乾燥して水分重量を量ることで、液相率、固相率を算出できる。

以下に実容積法（実容積計）の基本原理解を示す。機構はやや異なるが土壌三相計もこれと同じ原理を利用している。測定操作は各製品の説明書に従うこと。

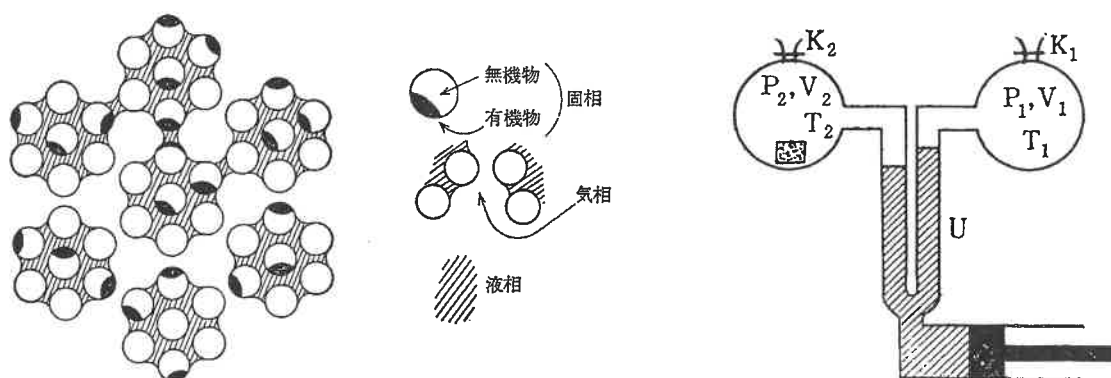


図 4-1(上左) 土壌三相の模式図

土壌学概論, 犬伏和之・安西徹郎編, 朝倉書店 2001, p. 6 より

図 4-2 (上右) 実容積法・実容積計の原理

土壌物理性測定法, 土壌物理性測定法委員会編, 養賢堂 1972, p. 4 より

【基本原理（図 4-2）】

気体の圧縮に関するボイルの法則を利用。左右のセルの容積は同じで、圧力(P)、温度(T)が一定のとき ($P_1=P_2$, $T_1=T_2$)、気相容積(V)が $V_1 > V_2$ であれば、ピストンを左に動かす圧縮過程で常に $P_1 < P_2$ となり、連通管の水面は当初の容積の大きい V_1 側が高くなる。コック(K)を開いて水面が高い側のセルに水を加えて密閉・再圧縮し、水面の高さを合わせると、添加水量から最初の容積差を測定できる。

【土壌三相計に関わる注意点】

- ・土壌採取の詳細は別項参照。各種分析に対応できるよう、通常は採土管の上下を現地土壌の上下に合わせる。採取後は実容積の測定まで衝撃は厳禁とする。
- ・土壌試料の採取と測定にあたっては十分な反復をとる。
- ・実容積法はその原理から、一連の操作がほぼ一定温度下で行われることを前提とする。また土壌孔隙の気相がすべて大気と連続しているという仮定に基づくため、水分の多い粘質土壌などでは測定誤差を生じやすい。
- ・試料室の気密性が重要なため、密着部にシリコングリスを塗布する。
- ・アナログ機種のリュームゲージの長針値は、短針目盛間の達観値に等しい。

イ 実容積測定後の操作と計算（全容積 100 mL の場合）

土壌試料の実容積 (V) の測定後、秤で全重量 (W) を測定する。

続いて乾燥機で 105°C、24 時間乾燥し、全重量を測定する。

*ここでは乾燥前後の重量差 (=水分重量) が重要。したがって上蓋を外して試料円筒ごと乾燥し、全重量も上下蓋付き (土の落下や乾燥・吸湿の防止にもなる) の測定でよい。なお採土管のみを秤量しておくとも固相重量が分かり、仮比重のほか、土壌母材の特性が反映される真比重も算出できる。

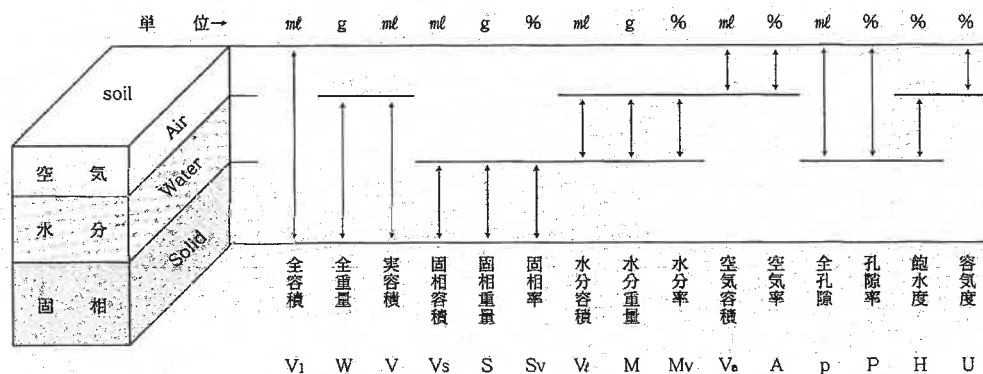
乾燥前後の重量差 $g =$ 水分重量 $g(M) =$ 水分容積 $mL(V_l) =$ 水分率 $\%(MV)$

固相率 $\%(SV) =$ 固相容積 $mL(V_s) =$ 実容積 $mL(V) -$ 水分容積 $mL(V_l)$

空気率 $\%(A) =$ 空気容積 $mL(V_a) = 100 -$ 実容積 $mL(V)$

孔隙率 $\%(P) = 100 -$ 固相率 $\%(SV)$

注) 近年は液相率, 気相率にかわり水分率, 空気率の用語が使われることが多い。



- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| ①空気容積 $V_a = 100 - V$ | ⑩含水率 $M_m = M/W \times 100$ |
| ②空気率 $A = V_a$ | ⑪含水比 $M_o = M/S \times 100$ |
| ③固相容積 $V_s = (W - V)/(d - 1)$ | ⑫飽水度 $H = M_v/P \times 100$ |
| ④固相率 $S_v = V_s$ | ⑬容気度 $U = 100 - H$ |
| ⑤水分容積 $V_l = V - V_s$ | ⑭真比重 $d = S/V_s$ |
| ⑥水分率 $M_v = V_l$ | ⑮仮比重 $d_a = S/100$ |
| ⑦水分重量 $M = V_l$ | ⑯実比重 $d_m = W/V$ |
| ⑧固相重量 $S = W - M$ | ⑰水分固相率 $L_s = V_l/V_s$ |
| ⑨孔隙率 $P = 100 - V_s$ | ⑱全容積 $V_t = 100$ |

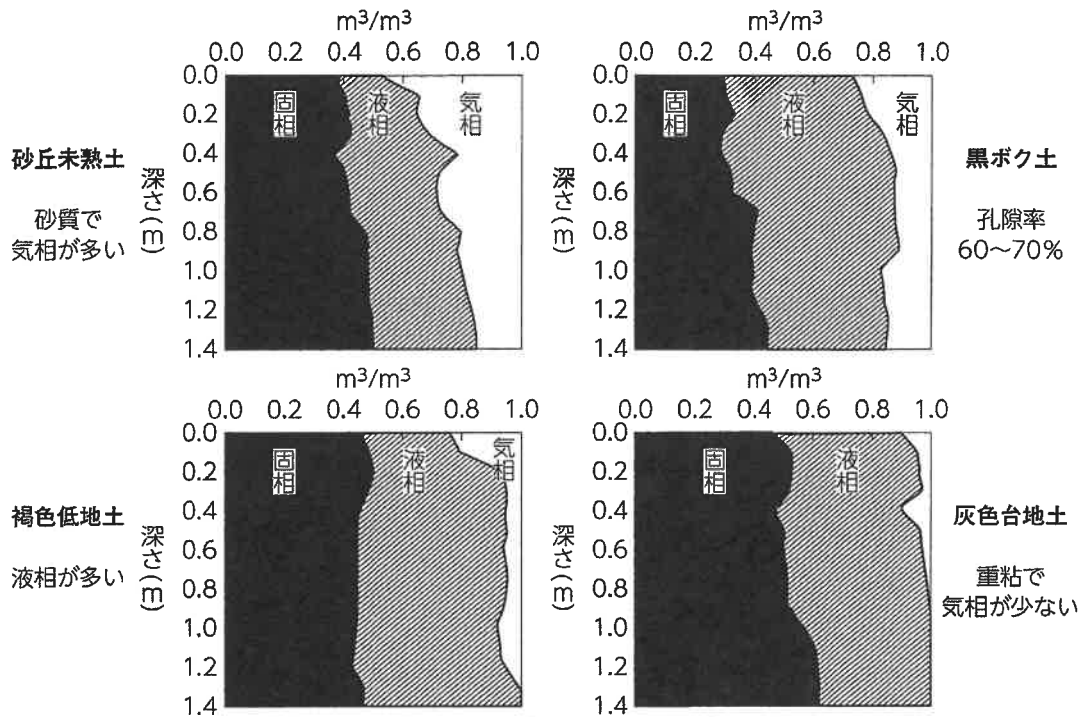
(株)大起理化工業製品案内資料より

ウ 望ましい三相分布と測定例

表 4-1 作物生育に望ましい土壌種類別の三相分布 (pF 1.5)

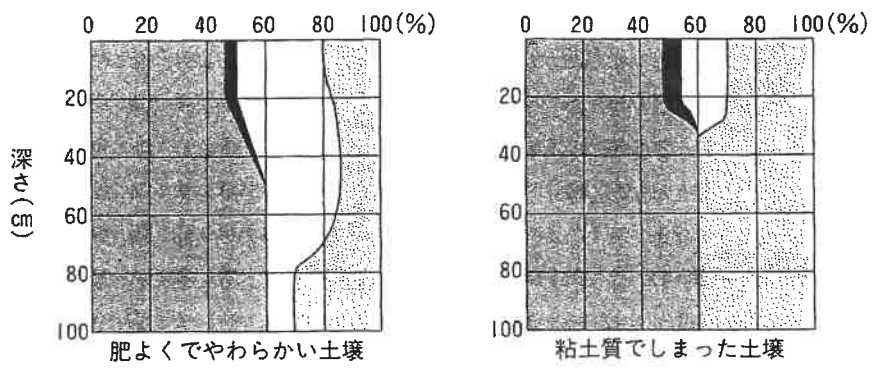
土壌の種類等	固相 (%)	液相 (%)	気相 (%)
砂土 (S)	50	10	40
埴土 (C)	40	20	40
重埴土 (HC)	40	30	30
火山灰土	30	30	40
(湿害)	—	増大	減少
(干害)	—	減少	増大

施肥診断技術者ハンドブック, JA 全農肥料農業部 1999, p.28 より抜粋・一部改変



二相分布はもともとの土質によるところも大きい。

土と施肥の新知識, 渡辺和彦・後藤逸男・小川吉雄・六本木和夫著, 農文協 2012, p. 23 より



無機物
 有機物
 } 固相

気相

液相

図 4-7 膨軟な土壌としまつた土壌の二相分布の例
 基礎シリーズ栽培環境入門, 角田公正・松崎昭夫・松本重男編著,
 実教出版株式会社1998, p.64 より
 (引用元: 川口桂三郎ほか, 土壌学 1980)