

植物根のカチオン置換容量と養分摂取

森 田 修 二

SHUJI MORITA : Cation exchange capacity of root and nutrient uptake by plant

要旨 植物根のカチオン置換容量 (cation exchange capacity, CEC) は植物の養分摂取に関係が深い。ここにおいては先づ植物の養分吸収における根の CEC の意義を述べる。次いで CEC の実体, 測定方法, 測定値を記述する。さらに根の部位や成長と CEC との関係を説明する。根の CEC とカチオン吸着間のドンナン平衡を論じ, また CEC に関係ある種々の因子, 窒素, カチオン含量, 重金属, 粘土鉱物等について述べる。

I ま え が き

根がカチオンを摂取する機構として種々の説が提唱されている。カチオン摂取の第一段階は養分カチオンが根に移行することである。これに関しては植物細胞が濃度勾配に逆って積極的に吸収する active transport, 濃度勾配に従って消極的に透過して行く passive permeation が考えられているが, この外に根と土壤粒子コロイドとのイオン置換が一つの要因として挙げられている。Jenny²²⁾ は接触置換は CO₂ のような中間物の存在を要しないと述べ, Mattson^{26, 28)} らは植物根が土壤から陽イオンを吸う働きについて根におけるアシドイド (acidoid) (H-colloid) の存在を考えた。

植物根がカチオン置換容量 (cation exchange capacity, 以下 CEC と略記する) を有することは, 既に 1916年に Devaux⁹⁾ が述べた。根の CEC は最初は植物の無機栄養に密接な関係を有しているものでは無いと思われた。しかし土壤コロイドに関する多くの報告が出て来て, 土壤中の養分の植物体内への動きに CEC が関係あることが想像され, 植物の養分状態に影響を有すると考えられて来た。しかし各研究者によりこの見解は必らずしも一致しては無く, Epstein および Leggett¹⁵⁾ によると CEC による養分吸着は養分摂取の前段階では無いとも述べている。

II 根の CEC の実体

生きている根の表皮細胞の表面は H⁺, OH⁻を解離す

る物質を含む。根で H⁺ の授受に関係するのには少くとも二種類の物質がある。その一は根の表皮膜の代謝活動から生じるもので HR で表わされ, 今一つは細胞膜にあり解離度の弱い酸で RCOOH で表わされる。acid group の解離のために根の表面は負荷電を有し, Lundegardh²⁴⁾ はこれは磷酸の radical であろうと述べた。

一般に根の表面にある group の性質如何を問わず, 代謝過程で作られる H⁺ は植物根の表面にあり, この H⁺ とカチオンとの間に置換が行われる。Devaux⁹⁾ は根毛壁のペクトース物質がカチオン置換に関与し置換体として働くと述べた。Mattson²⁹⁾ はメチレン・ブルーを使用し, 根の先端に近い表層中にペクチン物質があることを明らかにした。Keller および Deuel²³⁾ は

Table 1. C.E.C., pectin content, and respiration of leek roots

Distance from apex (mm)	C. E. C.		Pectin me/100g dry roots	Respiration ml O ₂ /100g dry wt/hour
	me/100g dry roots	me/sq. m		
0— 2.5	134	11.9	63	212
2.5— 5	120	10.1	56	201
5— 10	57	5.8	53	152
10— 20	65	6.0	51	160
20— 40	39	3.6	50	130
40— 60	28	3.2	48	119
60— 80	26	3.4	48	116
80—100	30	4.1	45	110
100—120	33	5.1	40	94
120—140	46	7.3	36	80
Whole roots	26	5.0	36	—

京都府立大学農学部土壌学, 植物栄養学研究室

Laboratory of Soil Science and Plant Nutrition, Faculty of Agriculture, Kyoto Prefectural University, Kyoto, Japan.

昭和47年7月27日受理

小麦、トウモロコシ、マメ、タバコの根の70—90%はペクチン物質のカルボキシキルによる、さらにペクチンのエステル化が進むと CEC は低下すると述べた。Crooke ら⁸⁾は Table 1 に示すように、リーキ根につき CEC はペクチン含量に正比例することを見出した。

根のカチオン置換に関係するのは芳香族アルコールであるとも云われ⁹⁾、またアミノ酸であろうとも述べられ⁵⁾、表皮膜のカルボキシキル基もカチオン置換に大切な役割をする。CEC を生じるカルボキシキル基はカチオンの移動、たとえば土壌コロイドから根へ Ca が移行する時に活潑に動く。

III CEC の測定法

1. 滴定による方法

根の CEC を測定する方法の一として H-根を一定の pH まで滴定して求める方法がある。H-根を作るには電気透析による方法と酸洗滌による方法とある。

(a) 電気透析による方法

一例として Drake らの方法¹¹⁾を述べる。新鮮根を電気透析にかけて H-根とし、これに N KCl を加えてアルカリで滴定する。滴定値は根の内部のコロイド物質の影響のため時間と共に増加するが、値の再現性の点から5分間で pH 7 となるまで滴定する。

(b) 酸洗滌による方法

この方法の例として Helmy, Elgably ら^{18, 19)}の方法は、切断根を酸で洗い、酸が無くなるまで水洗し、KCl 或は BaCl₂ 溶液を加え、約 0.04 N KOH 或は

Ba(OH)₂ を用いて一定の pH になるまで滴定する。

2. 金属カチオンで飽和する方法

これは根を一旦金属カチオンで飽和して後他のカチオンで置換し、置換されたカチオン量から求める方法である。

位田ら²¹⁾の方法は根を乾燥粉碎し一定量を石英砂と共に円筒状漏斗につめる。これを塩酸で洗い水洗後 pH 7 の酢酸カルシウムを流し、次に塩酸でカルシウムを置換して置換容量を求める。

Ando ら¹⁾は植物に普通には含まれていないカチオンを用いるのが良いと考え、先ず根を LiCl の溶液中で30分間窒素ガスを通じた嫌気状態で Li を吸わせた。これは新陳代謝で吸われる Li と区別するためである。次にこの根を水洗乾燥灰化分析して Li を測り、CEC を求めた。

Bartlett⁹⁾は NaCl を用いて CEC と anion exchange capacity とを測定した。

以上二、三の例を述べたに過ぎないが、これらの二大別した方法に準じて各測定者により種々の方法が行われている。

IV CEC の測定結果

根の CEC は大部分が表面現象に基くと考えられる。故に単位面積について表わす、即ち me./sq.m がよい。

CEC と Ca の吸着および吸収を単位表面積および単位重量について表わした Smith および Wallace²⁰⁾の Table 2 の結果はこの関係を明らかに示している。

Table 2. Correlation coefficients for root cation-exchange capacity expressed on an area or weight basis with Ca adsorption and absorption of excised roots of citrus, avocado, and other plant species in 2 minutes in 0.10 N CaCl₂

Cation-Exchange Capacity	Correlation Coefficients	
	All plants	Avocado and citrus
With adsorption:		
me./sq. meter with me. Ca/sq. meter	0.973**	0.990**
me./sq. meter with me. Ca/100g. D.W.....	0.798**	0.998**
me./100g. D.W. with me. Ca/sq. meter	-0.084	0.618
me./100g. D.W. with me. Ca/100g. D.W.....	0.528	0.709
With absorption:		
me./sq. meter with me. Ca/100g. D.W.	0.795**	0.981**
me./100g. D.W. with me. Ca/100g. D.W.....	0.576	0.735
With "total uptake":		
me./sq. meter with me. Ca/100g. D.W.	0.747*	0.995**
me./100g. D.W. with me. Ca/100g. D.W.....	0.546	0.721

* Significant at 0.05 level. **Significant at 0.01 level.

しかし実際は表面積の測定は困難である故、単位重量について表わす、即ち me/g が普通である。Drake¹¹⁾ が種々の植物について測定した値を Table

3, 位田ら²¹⁾ が種々の作物について得た値を Table 4 に、森田および青木²⁴⁾ が種々の果樹について得た値を Table 5 に示す。

Table 3. Cation-exchange capacity of plant roots.

PLANT	ULTIMATE pH	CATION-EXCHANGE CAPACITY
		me/100 gm*
Dicotyledons		
Legumes		
Soybeans (Lincoln), <i>Glycine soja</i>	3.26	58.9
Canadian fled peas, <i>Pisum sativum arvense</i>	3.35	49.6
Red clover (medium), <i>Trifolium pratense</i>	3.37	47.5
Hairy vetch, <i>Vicia villosa</i>	3.41	44.1
Alfafa, <i>Medicago sativa</i>		
Atlantic	3.42	48.0
Kansas common	3.49	40.0
Ladino clover, <i>Trifolium repens var</i>	3.43	43.4
Vegetables		
Irish potato, <i>Solanum tuberosum</i>	3.62	38.1
Tomato, <i>Lycopersicum esculentum</i>	3.67	34.6
Weeds		
Ragweed, <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	3.27	58.9
Pigweed, <i>Amaranthus retroflexus</i>	3.35	42.3
Smartweed, <i>Polygonum pensylvanicum</i>	3.48	41.1
Purslane, <i>Portulaca oleracea</i>	3.53	40.7
Lamb's-quarters, <i>Chemopodium album</i>	3.94	25.0
Monocotyledons		
Grasses		
Reed canary, <i>Phalaris arundinacea</i>	3.80	30.8
Alta fescue, <i>Festuca elatier arundinacea</i>	3.00	30.4
Orchard grass, <i>Dactylis glomerata</i>		
Colby	3.08	25.6
Commercial	3.72	24.9
Smooth brome, <i>Bromus inermis</i>		
Southern	3.65	24.8
Northern	3.72	24.4
Timothy, <i>Phleum pratense</i>	3.78	22.6
Tall meadow oat grass, <i>Arrhenatherum elatius</i>	3.07	22.5
Canadian bluegrass, <i>Poa compressa</i>	3.78	24.1
Kentucky bluegrass, <i>Poa pratensis</i>	3.83	21.6
Redtop, <i>Agrostis alba</i>	3.92	17.3
Rhode Island or Colonial bentgrass, <i>Agrostis tenuis</i>	3.95	16.3
Cereals		
Corn (Yellow Dent), <i>Zea Mays indentata</i>	3.68	26.0
Sweet corn (Colden Cross), <i>Zea Mays saccharata</i>	3.80	22.2
Spring oats, <i>Avena sativa</i>	3.78	22.8
Rosen rye, <i>Secale cereale</i>	4.12	15.1
Barley, <i>Hordeum vulgare</i>	4.25	12.3
Winter wheat, <i>Triticum vulgare</i>	4.70	9.0
Weeds		
Nutgrass, <i>Cyperus esculentus</i>	3.51	28.7
Quackgrass, <i>Agropyron repens</i>	3.78	19.8
Foxtail, <i>Setaria glauca</i>	4.65	11.4

* Oven-dry weight.

Table 4. 作物の根の塩基置換容量

種類	me/100g	種類	me/100g
夏作物		小松菜	53.1
ナス	49.4	京菜	52.9
トマト	53.0	体菜	54.8
キウリ	65.8	タカナ	42.8
トウガラシ	45.1	シュンギク	70.0
インゲン	53.4	チシヤ	69.6
サツマイモ	58.3	フダンソウ	55.6
イネ	23.7	ホーレンソウ	53.0
コーン	19.2	パセリ	46.3
夏カンラン	45.9	ネギ	29.7
サトイモ	50.2	冬作物	
秋作物		ソラマメ	59.6
ニンジン	51.3	イチゴ	63.9
ダイコン	53.6	ミツバ	70.1
カブ	47.5	タマネギ	31.3
ヒノナ	43.1	タム	14.2
ハクサイ	51.0		

Table 5A. Cation exchange capacity of root of fruit tree, preliminary.

Grape, Muscat 4 months nursery tree			
Treatment	pHu	pH KCl	CEC me/100g
Electrodialysis, 5 hours	4.7	3.9	21.9
Electrodialysis, 10 hours	4.5	4.2	23.1
0.02 N HCl, 20 minutes	4.4	3.8	21.9
0.1N HCl, 10 minutes	4.7	3.5	27.0
0.02 N HCl, 1 hour	4.2	3.8	28.7
0.1N HCl, 1 hour	4.1	3.6	28.6
0.1N HCl, 1 hour; electro-dialysis, 10 hours	4.3	3.7	28.1
Peach			
0.1 N HCl, 1 hour		3.7	5.4
0.1N HCl, 1 hour; electro-dialysis, 10 hours		3.7	6.0
Kaki (<i>D. Kaki</i> stock)			
Electrodialysis, 5 hours	4.5	3.7	6.5
Alcohol; 0.1N HCl 1hour; electro-dialysis, 10 hours	3.2	3.7	7.7

Table 5B. Cation exchange capacity of root of fruit tree.

	pHu	pH KCl	CEC me/100g
Sanbokan (trifoliolate orange stock)	4.0	3.4	17.0
Unshu (trifoliolate orange stock)	4.5	3.4	15.7
Grape	4.1	3.5	11.7
Kaki (<i>D. Kaki</i> stock)	4.2	3.7	7.7
Kaki (<i>D. Lotus</i> stock)	4.5	3.7	6.9
Pear	4.6	3.6	7.6
Peach	4.7	3.7	6.0

Table 5C. Analytical result of root on Ca, K and N

	CEC me/100g	Ca %	K %	Ca+K %	Ca/K	N %
Unshu (citrus)	15.7	1.48	0.052	1.532	28	2.13
Grape	11.7	0.31	0.056	0.366	5.3	0.91
Kaki	7.7	0.04	0.061	0.101	0.69	1.53
Pear	7.6	0.42	0.012	0.432	35	0.36
Peach	6.0	0.22	0.036	0.356	6.2	0.82

このように一般に双子葉植物は単子葉植物よりも大きい CEC を示し、双子葉植物の中でもマメ科植物は大きく単子葉植物中ではカホン科植物は小さい。果樹ではミカンが大きくモモが小さいが、さらに品種による違いよりも成木、幼苗による差異の方が大きい。

前述のように根の置換容量は時間とともに増し従ってカチオンの吸着も増す。Mouat, Walker³⁵⁾ は電気透析したブラウントップ根がKを収着する模様を調べた。Fig. 1 に示すようにある時間を経過してから吸収が起

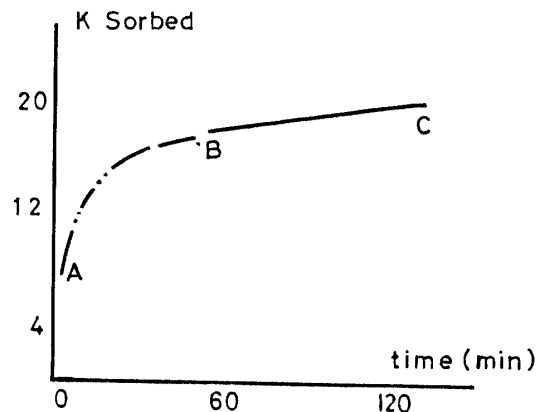


Fig. 1. Time course of K sorption (me/100g dry weight) by browntop roots.

る。A Bは吸着を、B Cは代謝過程を示すが、A BとB Cとが曲線上でつながらないのはKの代謝活動が増したためである。吸収が起るのには可成りの遅れがある。真のCECはA Bが平衡になった時の値である。吸着曲線が吸収曲線に移る点がCECと考えられる。

森田がカンキツ新鮮根についてCECと時間との関係を求めた結果(未発表)はFig. 2に示す通りで、10分までは急増し後増加の割合は減少して行く。

さらにMouatら³⁵⁾の結果をTable 6に示す。(a)5分後の読み、(b)は吸着曲線を2時間に外挿した場合、(c)は屈曲点から求めた値が示されてある。比較値を求めるのなら5分間で十分である。

Table 6. Cation-exchange capacity (me%) of plant roots by different readings.
Standard error given in parentheses

Plant roots		Method		
		(a) 5-min. reading	(b) Regression of adsorption	(c) Pt. of inflection
White clover	Old roots	16.0 (.96)	39.1 (.92)	35.4 (.63)
	Young roots	22.2(1.1)	43.0(1.1)	41.8 (.80)
S.R. ryegrass	Old roots	15.7 (.20)	34.7 (.64)	32.3 (.81)
	Young roots	9.9 (.55)	23.1(1.0)	20.2 (.10)
Cockfoot	Old roots	14.4 (.94)	29.8(1.3)	28.7 (.89)
	Young roots	14.3 (.25)	24.6 (.70)	23.0 (.47)
Browntop	Old roots	10.1 (.50)	17.5 (.53)	15.8 (.50)
	Young roots	7.6 (.18)	15.2 (.07)	14.0 (.15)

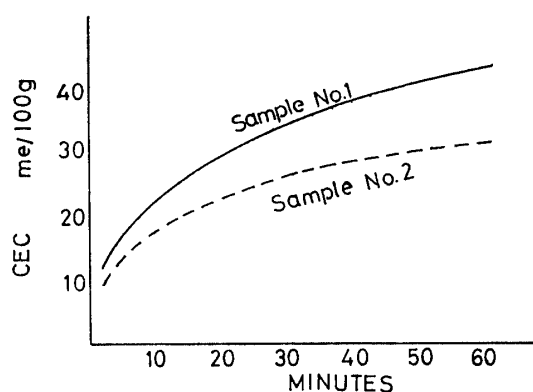


Fig. 2. Time course of CEC determination by citrus roots

IV 根の部位と CEC

前述 Mattson²⁹⁾ は根の acidoid の最も活性の高いのは先端に近い部分にあることを明らかにした。また Table 1 に示すようにリーキ根で CEC の最も高いのは 0~2.5mm の部分である。Smith ら³⁰⁾ もオレンジについて同様な結果を得た。

先端からの距離が増すと CEC が減少する理由として根の細胞膜が発達して厚くなると内部に出来たペクチン物質、含水炭素の層が外部に接する程度が少くなり置換の度合いが減少したためであろう。とにかく根冠直後の部分は急速に細胞分裂を行い、CEC の高いのはこれによるものと推測される。カチオンの摂取も先端が大で、Williams および Coleman⁴⁶⁾ によるとトウモロコシおよびインゲンマメに Cs* Cl を吸わせて放射能を測ったところ、Fig. 3 のように最初の 2mm は他の部分よりも大であった。このことはカチオン置換はイオンの蓄積と同様に成長点附近が最大であることを示す。

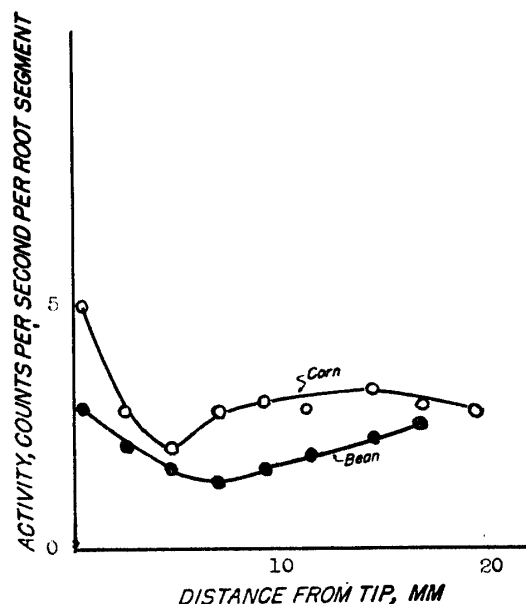


Fig. 3. Lateral distribution of adsorbed Cs* on root surfaces.

V 成長と CEC

Mane ら²⁶⁾ は単子葉植物としてトウモロコシ、双子葉植物としてインゲンマメを用い、発芽から径的に CEC の変化を測定した。トウモロコシの場合、CEC は Table 7 に示すように 15 日までは漸次増大するが、9~30 日の間はほぼ一定で以後は減少した。インゲンマメでは CEC は幼植物の時から開花の始めに至るまでの間は増加し、開花から半熟期の間は一定し、後に減少した。

森田ら³⁴⁾ は Table 5A, 5B に示すようにブドウについて幼苗の CEC は成木の CEC よりも大きいことを実験し、同様な結果を Smith および Wallace³⁸⁾ はブドウ、オレンジについて得ている。

Helmy, Elgabaly¹⁹⁾ によると NaCN, NaN₃, Na₃A_s

Table 7. Dry matter, cation content of tops and root-cation exchange capacity of maize (Hy-Canga-101) as influenced by age.

Age (days)	pH of root-KCl system	CEC me/100 g dry roots	Dry matter g per pot			Contents of tops me per 100 g dry matter				
			Tops	Roots	Total dry matter	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Total (Ca+Mg+K)	Ca/K ratio
3	5.6	11.55	0.265	0.179	0.44	30.8	50.9	24.0	105.7	1.28
6	5.6	11.55	0.414	0.222	0.63	35.1	55.1	39.4	129.6	0.89
9	5.5	12.10	0.966	0.283	1.25	37.8	54.1	53.6	145.5	0.70
12	5.5	12.10	1.012	0.435	1.44	41.0	41.4	37.4	119.8	1.09
15	5.4	13.20	1.487	1.007	2.49	46.8	33.4	36.5	116.7	1.28
30	5.5	12.10	5.330	4.340	9.67	50.5	27.5	30.9	108.9	1.63
45	5.6	10.86	8.030	4.558	12.58	44.7	24.9	29.3	102.1	1.63
60	5.7	9.76	12.740	6.265	19.00	45.2	23.3	28.6	97.1	1.57
75	5.7	9.23	21.480	10.080	31.56	45.7	22.2	27.0	94.9	1.69
90	5.8	8.20	21.572	10.315	31.88	43.1	20.6	21.7	85.4	1.98
105	5.8	8.05	23.100	10.330	33.43	41.0	19.6	20.9	81.5	1.96

O₂ のような成長抑止作用を有するものは低濃度においても大麦根の CEC を減少せしめた。2.4D のような成長促進剤は低濃度では大麦根の CEC を増加させたが或る限界以上では減少の傾向が見えた。

なお、アルコールおよびエーテルで処理して活力を減少せしめた場合における大麦根の CEC の変化を Helmy ら¹⁹⁾ が実験したところ Table 8 のようにいずれも処理時間が長いほど CEC は減少した。

Table 8. Effect of immersion in alcohol and ether for different times on CEC of barley roots. me/100 g

Time of immersion (minutes)	CEC	
	Alcohol	Ether
0	8.03	8.03
1	7.84	7.55
5	7.83	6.07
15	7.68	5.85
30	7.65	5.38
60	6.78	4.35
120	5.09	4.32

しかし生きている根、死んだ根について Smith および Wallace,²⁰⁾ Williams および Coleman¹⁶⁾ が行った結果は、Table 9 に示すように殆ど変化がなかった。

このことは森田・青木³⁴⁾も実験した。根の CEC は根の生死に関係ないと云う実験が多く、これらの結果考えられることはカチオン置換物質は根の生きていない部分に関係があり、恐らく表皮細胞の外壁と関連があると思われる。植物根によるイオンの蓄積は代謝活

Table 9. Exchange properties of living and dead root.

Rough lemon (3-cm. sections)	CEC
Alive at 26°C	49 me/100 ³⁵⁾
Alive at 0°C	51
Dead at 26°C (soaked in ether for 1 hour)	50
Tomato {living killed (ether)}	0.263 me/100g fresh weight ⁴⁵⁾
Tobacco {living killed (ether)}	0.318
Tobacco {living killed (ether)}	0.257 0.259
Peanut {living killed (ether)}	0.470 0.484

動と勿論関係があるが、とにかく根のイオン置換は、イオンの蓄積過程においてある役割を演じるものである。

VI 根の CEC と原子価効果

根が suspension effect を示し 2 重層を有することは Williams および Coleman¹⁶⁾ が述べ、Mattson および Larson²⁷⁾ は根はコロイド的性質を有し粘土粒子間にカチオンの授受を行うと述べた。Mattson²⁸⁾, Wiklander⁴⁴⁾ らはドンナン平衡を用いてカチオン置換を説明した。

ドンナン系で高い CEC を有するコロイドは 2 価イオンを 1 価イオンよりも比較的大きい結合エネルギーで吸着する。ドンナン系で異なる原子価のカチオン分布は、内外溶液のカチオンの活動度により支配され次の式が成立つ。

$$\frac{(M^+)_{i}}{(M^+)_{o}} = \frac{\sqrt{(M^{2+})_{i}}}{\sqrt{(M^{2+})_{o}}}$$

但し $(M^+)_i$ は内溶液のカチオンの活動度, $(M^+)_o$ は外溶液のカチオンの活動度。

ドンナン分布によると容積の増加或は外液の稀釈により, 1価よりも2価イオンの吸着が増す。

$$\text{例 } \frac{K_i^+}{K_o^+} = \frac{\sqrt{(Ca^{2+})_i}}{\sqrt{(Ca^{2+})_o}}$$

この式で K_o^+ および Ca_o^{2+} の活動度が 0.01, K_i^+ の活動度が 0.1 なら Ca_i^{2+} の活動度は 1 となり, 内液では $Ca/K=10/1$ となる。これを稀釈して K_o^+ および Ca_o^{2+} の活動度が 0.0001, K_i^+ の活動度が 0.01 となると Ca_i^{2+} の活動度は 1 となり, $Ca/K=100/1$ となる。このように稀薄溶液からは K よりも Ca が多く蓄積される。

次に非拡散性アニオンの存在を考えると, KCl 系中のイオン分布は

$$X_{Cl} \cdot X_K = Y_{Cl} (Y_K + Z_K)$$

- X 外液中遊離にあるカチオン, アニオンの活動度
- Y 内液中のそれぞれの活動度
- Z 非拡散性アニオンと結付いたカチオンの活動度

上式より

$$\frac{X_{Cl}}{Y_{Cl}} = \frac{Y_K + Z_K}{X_K} \dots\dots\dots(1)$$

CaCl₂ 系中では

$$X_{Cl}^2 \cdot X_{Ca} = Y_{Cl}^2 (Y_{Ca} + Z_{Ca})$$

$$\therefore \frac{X_{Cl}}{Y_{Cl}} = \frac{\sqrt{Y_{Ca} + Z_{Ca}}}{\sqrt{X_{Ca}}} \dots\dots\dots(2)$$

(1), (2)式より

$$\frac{Y_K + Z_K}{X_K} = \frac{\sqrt{Y_{Ca} + Z_{Ca}}}{\sqrt{X_{Ca}}} \dots\dots\dots(3)$$

Mattson²⁸⁾ は根のアシドイド群を非拡散性アニオンであるとして CEC はこれに基因すると考えた。アシドイドの力が強いほど低いイオン濃度で2価イオンの方が多く吸われる。吸収される2価, 1価イオンの相互間の割合はまた電荷密度により支配され, 代謝過程にはよらない。Hで飽和した根に CaCl₂, KCl を別々に加えて吸われた Ca, K を求めたところ Ca > K であった。

二つの別々の系で Z が異なる場合, ある時点において外液のカチオン量が等しい時は次式が成立つ。

$$\frac{Y_{K1} + Z_{K1}}{Y_{K2} + Z_{K2}} = \left(\frac{Y_{Ca1} + Z_{Ca1}}{Y_{Ca2} + Z_{Ca2}} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(4)$$

この式で Y の値に相当する K, Ca の量および Z につき次の仮定を設ける。その一は Z は CEC に等しいこと, その二は CEC は蓄積された K, Ca に較べると遙かに小さいことである。故に上式から近似的に(5)式が得られる。

$$\frac{CEC_1}{CEC_2} = \frac{K_1}{K_2} = \left(\frac{Ca_1}{Ca_2} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(5)$$

この式は単イオンの溶液については近似的に成立する。

また電荷密度から考えて, Smith および Wallace¹⁷⁾ は電荷密度が1価および2価イオンの吸着に関係があるならば次式が成立すると述べた。

$$\frac{CEC_1}{CEC_2} = \left(\frac{Ca_1}{Ca_2} \right)^2 = \frac{K_2}{K_1} \dots\dots\dots(6)$$

しかし Huffaker および Wallace²⁰⁾ は Ca の項の平方根の方が正しいとし, これは多くの場合葉分析の結果から平方の式が検付されたが, 全分析値から考えると平方根による方がよいと述べた。

Mattson²⁸⁾, Elgabaly および Wiklander¹³⁾, Lundegardh²⁵⁾ らは前述のように根の CEC の高い植物は1価に比して2価イオンを多く吸うと述べ, 定性的には CEC_1/CEC_2 は Ca_1/Ca_2 および K_2/K_1 の関数である。K に対しては(5)よりも(6)式が適用される。(5)式は単一溶液の場合によく当てはまる。しかし1価, 2価カチオンが共存すると溶液或は土壌では

$$\frac{CEC_1}{CEC_2} = \frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{Ca_1 + Mg_1}{Ca_2 + Mg_1} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(7)$$

双子葉植物の根の CEC は単子葉植物の根の CEC の約2倍である。このことは双子葉植物中に2価カチオン含量の高いことを説明する。単子葉植物は低濃度で吸う Ca, Mg が少く, K の摂取量は双子葉植物よりも多い。故にマメ科植物と草類とを混播すると, 草類は CEC が小さいためマメ科植物よりも多量の K を摂取する。土壌中の K が少いと草類はマメ科植物と K を競合し, マメ科植物の収量に影響する。

Table 10. Ratios calculated from data found in the literature

Species	Source of data	$\frac{CEC_1}{CEC_2}$	$\frac{K_1}{K_2}$	$\frac{K_2}{K_1}$	$\left(\frac{Ca_1 + Mg_1}{Ca_2 + Mg_2} \right)^{\frac{1}{2}}$
corn/snapdragon	(12)	0.73	1.45	0.69	0.71
chrysanthemum/corn	(12)	1.48	0.97	1.03	1.30
stock/corn	(12)	1.53	0.89	1.13	1.63
larkspur/snapdragon	(12)	2.09(?)	1.45	0.69	0.83
corn (high N/low N)	(25)	1.27	0.74	1.34	1.20
soybean (high N/low N)	(25)	1.11	1.18	0.55	1.12

これらの関係は実際に種々の分析値と比較して検討されている。

Mc Lean³³⁾, Dunham¹²⁾ は多数の植物分析値と根の CEC とを報告したが、その一部を Table 10 に示す。

一つの例外を除いて（それは多分測定誤差と思はれる）は CEC_1/CEC_2 と $(Ca_1 + Mg_1/Ca_2 + Mg_2)^{1/2}$ とはほぼ近い値を示す。多くの場合 CEC 比は K_2/K_1 に近い。しかし K_1/K_2 に近似する場合もある。(7)式は定量的に CEC とカチオン含量の関係を表わすのに適当である。

森田および青木³⁴⁾が得た果樹根の CEC と根の Ca, K

とから計算してこれらの比率を求めると、CEC と Ca に関してブドウ/モモの場合に(6)式が、ナシ/モモの場合に(5)式が当てはまり、CEC と K についてはブドウ/モモの場合に(5)式が適用されるが、それ以外ではこれらの式は当てはまらなかった。Table 11に示す。またこの表で Smith および Wallace³⁵⁾が引用した値が示されてある。これを見ると一般に(6)式が当てはまるが California の場合は Ca に関してはむしろ(5)式の方がよく適用される。California の値と Florida の値とは必ずしも一致しないが、これは樹令や環境の違によるのであろう。

Table 11. Comparison of the ratios of root cation-exchange capacities of some citrus species with the square of the ratios of the Ca content and the reciprocal ratios of the K content of the leaves of Valencia orange on the various rootstocks⁽³⁵⁾ (Smith and Wallace)

Plant Species Compared	C.E.C. ₁ C.E.C. ₂	California			Florida		
		$(\frac{Ca_1}{Ca_2})^2$	$(\frac{Ca_1}{Ca_2})^{1/2}$	$\frac{K_2}{K_1}$	$(\frac{Ca_1}{Ca_2})^2$	$(\frac{Ca_1}{Ca_2})^{1/2}$	$\frac{K^2}{K^1}$
rough lemon sweet orange	1.30	0.90	0.97	1.30	1.28	1.06	1.16
rough lemon grapefruit	1.42	0.90	0.97	1.42	1.34	1.07	1.32
rough lemon sour orange	1.24	0.72	0.92	1.04	1.17	1.04	1.06
sweet orange sour orange	0.92	0.81	0.94	0.79	0.92	0.97	0.94
sweet orange grapefruit	1.11	1.00	1.00	1.09	1.04	1.01	1.14
grapefruit sour orange	0.84	0.81	0.94	0.73	0.86	0.96	0.81

Ratios of CEC, Ca and K contents of fruit tree roots³⁴⁾(Morita and Aoki)

	$\frac{CEC_1}{CEC_2}$	$(\frac{Ca_1}{Ca_2})^2$	$(\frac{Ca_1}{Ca_2})^{1/2}$	$\frac{K_1}{K_2}$	$\frac{K_2}{K_1}$
grape peach	1.95	1.98	1.19	1.56	0.64
peach pear	1.28	0.03	0.43	1.69	0.59

Table 12. Comparison of the ratios of K contents in three plant species with the ratios of their root cation exchange capacities

Plant species compared	$\frac{CEC_1}{CEC_2}$	$\frac{K_2}{K_1}$	$\frac{K_2 + K}{K_1 + K} \dots (1)$	$\frac{K_2 + K}{K_1 + K} \dots (2)$
Ladino clover Bentgrass	2.70	2.59	1.53	1.55
Ladino clover Kentucky blue grass	2.04	1.86	1.43	1.14
Bent grass Kentucky bluegrass	0.76	0.72	0.93	0.73

(1) +K₂O 120 lbs/A

(2) +K₂O 300 lbs/A

Gray ら¹⁷⁾ はラヂノクロバー, ケンタッキーブルーグラス, 或はベントグラスをK添加又は無添加で栽培した場合における植物体のK含量を求めた。植物根のCECとこれらK含量との関係を調べたところ, Table 12 に示す結果を得た。

Kを添加しない時は(6)式に合うがKを添加すると合致しない場合が生じて来る。

このことはさらに Table 13 で示すように, ブロムグラスとラヂノクロバーとをK含量の低いもの(group 10), 中間のもの (group 1), 高いもの (group 6) とで比較すると, 低いものでは逆比関係が当てはまる。ブロムグラスとレッドクロバーとでは中間比(group 2)

の時に関係が成立することが見られ, K含量が高い group 7 では相関が薄い。K含量が高い一連の植物 (group 7, 8, 9) ではCEC比とKの逆比との相関は低い (Smith および Wallace¹⁸⁾)。

植物による Ca, K の摂取に関するカチオン濃度, 根の CEC の影響に関して, Smith ら¹⁹⁾ は Ca 或はKの濃度を変えて実験を行った。Ca 含量がドンナン平衡に従うならば Ca 摂取は Ca 濃度或は活動度の平方根に従う可きである。菜豆, 大麦で実験したところ, Ca 濃度の1/10の減少に対して Ca 蓄積の減少は1/4から1/5程度であって, 1/10の平方根 1/3.1 よりも少な過ぎる値である。

Table 13. Comparison of the reciprocal ratio of K contents of legumes and grasses, when grown in association, with the ratio of their respective root C.E.C.

Plant species compared*	Root C.E.C.	C.E.C.		K contents	K ₂ /K ₁
		C.E.C. ₁	C.E.C. ₂		
	me./100g.			per cent	
1. bromegrass	24	0.56		2.54	0.45
ladino clover	43			1.13	
2. bromegrass	24	0.50		2.54	0.49
red clover	48			1.25	
3. ladino clover	43	0.90		1.13	1.11
red clover	48			1.25	
4. bromegrass	24	0.54		2.46	0.60
alfalfa	44			1.46	
5. ladino clover	43	0.98		1.50	0.97
alfalfa	44			1.46	
6. bromegrass	24	0.56		2.46	0.61
ladino clover	43			1.50	
7. bromegrass	24	0.50		3.62	0.76
red clover	48			2.75	
8. alfalfa	44	0.92		2.50	1.10
red clover	48			2.75	
9. bromegrass	24	0.54		3.62	0.69
alfalfa	44			2.50	
10. bromegrass	24	0.56		0.83	0.51
ladino clover§	43			0.42	

* Species grown in association were groups: [1, 2, 3]; [4, 5, 6]; [7, 8, 9]; and [10]
§ Legume showed K deficiency.

Table 14A. Uptake of Ca by beans and barley when grown for 12 hours in Ca⁴⁵ Cl₂ as influenced by concentration and presence of K ions.

Concentration		Beans/Barley		
Ca	K	Top(average)	Root(av.)	Whole plant (av.)
normality		ratio		
0.1	0~1.0	0.49	1.64	0.84
0.01	0~0.1	0.32	1.67	0.57
0.001	0~1	0.67	1.99	0.62
mean		0.49	1.77	0.66

Table 14B. Absorption of K_2 by beans and barley by low and high salt plants when grown for 12 hours in K_2Cl as influenced by K concentration and Ca ions.

Concentration		Bean/Barley		
Ca	K	Top(average)	Root (av.)	Whole plant (av.)
Low salt plants				
normality		ratio		
0.01	0~0.1	1.17	6.39	2.40
0.001	0~0.01	1.07	4.92	1.95
mean		1.12	5.66	2.16
High salt plants				
0.01	0~0.1	3.96	6.15	4.10
0.001	0~0.01	3.67	20.51	4.72
mean		3.82	16.66	4.47

CEC 比の関係を見ると、菜豆根では $2.47me/m^2$ 、大麦では $0.77me/m^2$ で、この比は 3.21 である。この値と Table 14A の値とを比較すると、根の Ca 比は 1.77 でこの平方は 3.13 となり、CEC 比にほぼ等しいが、他の部分の Ca 比は CEC とは合致しない。

K の場合は Table 14B のように全植物体について低塩量含有の時は K bean/K barley 2.16、高塩量含

有では 4.47、低塩量高塩量全平均は 3.29 で、地上部、根部と別々に考察しても CEC 比と逆比関係にはならなかった。このことの説明として溶液中の K の最低濃度は 0.001 N であるが、これは豆、大麦が K の摂取を逆数関係において成立させるのには十分に低い値ではない。また粘土のようなカチオン置換体が溶液中にないことも一原因である。

Table 15. Ratios of root CEC for the N and K levels, and ratios of cation content.

	CEC low N CEC high N		$\frac{(Ca+Mg)l.N}{(Ca+Mg)h.N}$		$\frac{(K+Na)l.N}{(K+Na)h.N}$	
	Cucumber	Fescue	Cucumber	Fescue	Cucumber	Fescue
LK	0.79	1.04	0.62	0.92	0.76	1.00
HK	0.82	1.01	0.82	1.06	0.72	0.98

LK refers to Low K, HK to High K

Table 16. K and Ca contents of leaves of 22-year-old Valencia orange trees maintained at two different N levels for 10 years before the analyses were made and cation ratios for the two N levels*

Age of Leaves	Potassium		Calcium		$\frac{K_0}{K_4}$	$\frac{Ca_4}{Ca_0}$	$\left[\frac{Ca_4}{Ca_0}\right]^2$
	No N	4N	No N	4N	ratio	ratio	ratio
months	%	%	%	%			
6	1.49	1.24	5.04	5.30	1.20	1.05	1.10
13	1.12	0.88	5.58	6.14	1.27	1.10	1.21
15	1.10	0.83	5.90	6.58	1.32	1.11	1.23
18	1.01	0.81	6.45	6.97	1.24	1.08	1.17
Means.....	1.18	0.94	5.74	6.24	1.26	1.09	1.19

* $\frac{\text{Root C.E.C. } 4N}{\text{Root C.E.C. } 0N} = \frac{25.0me./100g.}{19.7me./100g.} = 1.27$. No N refers to trees not receiving N and 4N refers to trees receiving 4 lbs. N per tree per year.

さらに Smith および Wallace⁽⁴⁾ は窒素施肥, カリ施肥と CEC との関係を研究した。その結果を Table 15に示す。この場合は(6)式よりも $CEC_1/CEC_2 = Ca_1/Ca_2 = K_1/K_2$ が当てはまる。しかし長年窒素施肥を行った成木バレンシアオレンジに対する葉のカチオン含量と窒素との関係は Table 16 に示す通りで, 窒素の量により CEC に差違を生じ, CEC (0 N) 19.7 me/100g, CEC (4N) 25.0 me/100g でこの比率は 1.27 である。K の逆比は 1.26, Ca の平方比は 1.19 でこれら

の値は近似して $CEC_1/CEC_2 = (Ca_1/Ca_2)^2 = K_2/K_1$ の関係は成立する。

Huffaker および Wallace⁽²⁾ がトウモロコシ, カンキツ, 大豆につき砂耕, 土耕で N の量を種々に変えて実験したところ Table 17, 18 のような結果を得た。これから見ると相関は高いように思われるが実際においては複雑である。砂耕の場合は CEC 比と 2 価カチオンの比率は相関が低い。またある場合には CEC 比は K_2/K_1 よりも K_1/K_2 によく対応する。

Table 17. Cation-exchange capacity and cation ratios.

Combination	Sand				Soil			
	$\frac{CEC_1}{CEC_2}$	$\frac{K_1}{K_2}$	$\frac{K_2}{K_1}$	$\left(\frac{Ca_1 + Mg_1}{Ca_2 + Mg_2}\right)^{\frac{1}{2}}$	$\frac{CEC_1}{CEC_2}$	$\frac{K_1}{K_2}$	$\frac{K_2}{K_1}$	$\left(\frac{Ca_1 + Mg_1}{Ca_2 + Mg_2}\right)^{\frac{1}{2}}$
Citrus/soybean	0.97	0.96	1.05	1.07	0.27	1.19	0.84	1.24
Citrus/corn	2.21	0.53	1.88	1.45	2.36	0.59	1.67	2.69
Soybean/Corn	1.28	0.56	1.79	1.36	3.28	0.50	2.00	2.15

N in solution varies from 1 ppm to 224 ppm. The data show the mean values.

Table 18. Correlation coefficients of the different sets of ratios obtained.

Ratios correlated	N	Level of Significance
Plants grown in soil		
$CEC_1/CEC_2 \times K_2/K_1$	+0.875	0.99
$CEC_1/CEC_2 \times (Ca_1 + Mg_1/Ca_2 + Mg_2)^{\frac{1}{2}}$	+0.638	0.95
$CEC_1/CEC_2 \times (Ca_1 + Mg_1/Ca_2 + Mg_2)^2$	+0.414	0.75
Plants grown in sand		
$CEC_1/CEC_2 \times K_2/K_1$	+0.746	0.99
$CEC_1/CEC_2 \times (Ca_1 + Mg_1/Ca_2 + Mg_2)^{\frac{1}{2}}$	+0.395	0.75
$CEC_1/CEC_2 \times (Ca_1 + Mg_1/Ca_2 + Mg_2)^2$	+0.033	0.50

ここで考えられるのは物理的 process である吸着は植物根による吸収の予備段階であることである。これは代謝過程に関係があるのではなくして, 植物根の負電荷密度が養液から吸収される 2 価イオンと, 1 価イオンとの相対的割合を調節することを意味する。根の CEC は free space に入る 2 価および 1 価イオンの相対的割合を調節する。この場合でも(7)式が適合すとは限らない。カンキツ/大豆では(5)式が当てはまる。

この研究で根の CEC に対する 1 価と 2 価カチオンの関係が取り扱われたが, これは環境によって変る。同じ 2 種類の植物で土耕, 砂耕の場合に K_2/K_1 或は K_1/K_2 が適合するがこの理由は判らない。根の CEC に影響する因子を研究することは, 肥料をカチオンの立場から考える上において大切である。

以上根の CEC と原子価効果に関する種々の実験例を述べたが, 二つの植物の CEC と Ca, K 含量の間に(6)式が当てはまらない理由として次の事柄が考えられ

る。

- 土壌中の Ca 或は K, 又は Ca, K 両者の含量が高く, ぜい沢吸収を起す。
- 植物体の一部分が分析に供されたこと, 植物の部分により成分の分布量が遠う。
- 植物部分の生理的年令は同じでない。未熟, 成熟期により, Ca, K の含量が遠う。
- ドンナン平衡が成立しない程度に多量のカチオンが存在する。
- 果樹の場合は接穂の影響。
- 果樹で果実収量の不均一や多年にわたる果実の摘去が養分含量に影響する。
- 土壌中の, Mg, Na をも含めて, カチオンの割合が結果に影響を及ぼす。
- CEC の測定誤差, その他の実験誤差。

またカチオンは予想された割合で吸はれても移動が起ると上部の組成はこれらの最初の吸収割合を反映し

ない。CEC とカチオンとの関係は溶液や肥沃土壌では明らかでなく、瘠薄土壌において一定の傾向が見られる。

VII CEC に関係ある諸因子

1. 窒素

原子価効果に対する窒素の影響については既に述べたが、窒素が増すと CEC が増すことは Helmy および Elgabaly¹⁹⁾, Crooke および Knight⁹⁾ が述べ、また Mc Lean および Franklin¹²⁾ は土壌に加えたNの量を増すと CEC が増加すると述べた。この理由としては蛋白質のアミノ group によると考えた。さらに細胞膜において起るペクチン質の増加や、根毛の増加、側根の先端の発達もその原因の一である。White ら⁴²⁾も N-レベルを増すことにより大麦根の CEC が50%以上増すと述べた。

Mc Lean ら²²⁾は植物の全窒素と根の CEC との間には関係があるとして、20種類の植物につき根のN-CECの相関係数を求めたところ $r=0.844$ なる結果を得た。CEC を表わすのに単位重でなく単位表面積で表はしたならば、この測定は実際は困難であるが、相関はさらに高いであろう。Fig. 4 では41種類の作物につき根 CEC-N の 関係を実験して得た結果が示されてある。 $R=0.868$, $r=0.819$ で見られるように高い相関が得られた。また同じ作物でNレベルを変えた時N含量と CEC と関係は、lowN の根の CEC は high N のものに比して小であった。

Smith および Wallace⁷⁹⁾によると、ある種類の植物では窒素施肥により根の CEC が増加した。根の CEC に対する窒素の影響は、低い根の CEC を有するもの(例、ウシノケグサ fescue)において著しかった。これはカチオン置換の場所がNに関係のある物質であることを示す。キュウリ根は CEC が非常に大きくNの影響はなかった。

Franklin¹⁶⁾は作物によりNを増すと根の CEC の増加を来たすものもあるが、増さないものもあると述べた。種々の果樹根の N含量と根の CEC, ミカン根の CECと葉, 根の N量との関係を求めた森田らの結果

Table 19. Correlation coefficients between CEC and mineral constituents of fruit tree roots.

Interaction	r
CEC×Ca	+0.851
×K	+0.530
×(Ca+K)	+0.838
×N	+0.693

r value significant at 5% level is 0.878

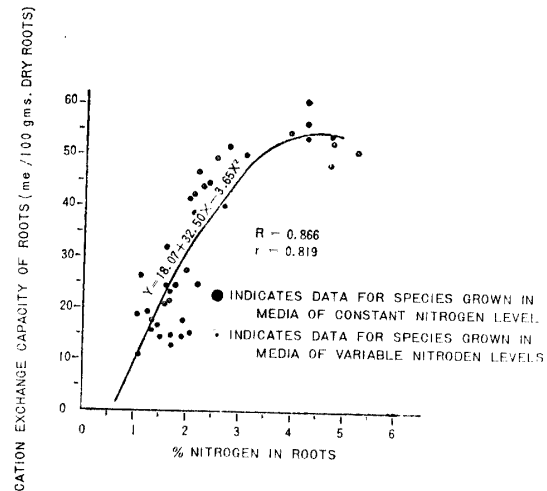


Fig. 4. The relationship between cation exchange capacities of roots and their percentages of nitrogen for 41 crops some of which were grown in media of variable nitrogen content.

³⁴⁾, ³⁵⁾(Table 19, 21)も CEC-Nの相関は認められなかった。

前述のように根の CEC が増すと2価カチオンを摂取することが多くなる。2価カチオンが多く吸われると1価カチオンの吸われるのが少くなることは前述の通りである。窒素を多く施用した時にカリを多く用いなければならない理由が判る。窒素により根の CEC が影響を受けるので、これは植物相互間の Ca, Mg, K, P に対する競合や、これら要素の植物と土壌間の競合に関係がある。

2. カチオン含量

根の CEC と植物成分量とは関係があると云われている。Crooke および Knight⁹⁾は既に発表された測定値から CEC と成分量との関係を考察し、これを集約して相関係数を求めた結果は Table 20 の通りである。

即ち種々の植物の葉或は地上部カチオン含量と根の CEC とは相関関係があり、CEC はその他 excess base

Table 20. Correlation coefficients derived from Beeson and Wöhlbier et al.

Interaction	Beeson	Wöhlbier and Kirchgessner
CEC		
×total cations	0.766***	0.875***
×total anions	0.100	0.406*
×excess base	0.715***	0.823***
×Fe+Mn	0.638	—
×ash	—	0.511***

Significance: ×=5 per cent level; ××=1 per cent level; and ***=0.1 per cent level.

Beeson, K.C. U.S.D.A. Miscel. Publ. (1941) No. 369

Wöhlbier, W., and Kirchgessner, M. (1957): Landw. Forsch. 10, 249.

(=total cation-total anion) とは同様の関係があり、また Fe+Mn と関係がある。CEC は灰分と相関があるが、灰分は蛋白質含量、エーテル抽出物と正の相関があり、粗繊維とは負の相関がある。多くの植物根の CEC を小から大へ順序に配列すると carbonaceous

type から protenaceous plant への傾向と一致する。

青木および森田³⁾が異常落葉を呈するカンキツ樹と成常なカンキツ樹について得た結果から根の CEC と種々のカチオン含量との相関関係を求めた値は Table 21に示す通りである。

Table 21. Correlation coefficients between root CEC and mineral constituents of abnormal and normal citrus tree.

Interaction		r	Interaction		r		
Normal orchard			Abnormal defoliation orchard				
Root CEC	× leaf	N	0.208	Root CEC	× leaf	N	0.157
	× "	Ca+Mg	0.155		× "	Ca+Mg	-0.050
	× "	K	0.106		× "	K	0.052
	× "	Fe+Mn	0.376*		× "	Fe+Mn	-0.004
	× root	N	-0.187		× root	N	-0.102
	× "	Ca+Mg	0.097		× "	Ca+Mg	0.133
	× "	K	-0.415*		× "	K	-0.214
	× "	Fe+Mn	-0.033		× "	Fe+Mn	0.039

Significance: * =5 per cent level

これを見ると相関があるのは健全樹根の CEC と葉の Fe+Mn との間に正、健全樹根 CEC と根 K の間に負の関係があるのみで、他の成分との間には関係が見出されなかった。

Mane ら²⁶⁾が前述のようにトウモロコシとインゲンマメにつき経日的に CEC の変化を測定した際、併せてカチオン含量をも定量した。その結果を Table 22 に示す。成長に伴う変化について考えると、トウモロコシでは根の CEC と地上部の乾物量、K⁺、Ca/K とは負の相関があり、全カチオンとは正の相関関係があった。インゲンマメでは地上部のカチオン含量は CEC とは相関がなかった。この場合 Mattson らの云うドンナン分布には従わない。この理由として次のことが考えられる。

Table 22. Relationship between root-cation exchange capacity and cation content of tops of maize and french bean as influenced by age (r-values)

Interaction	Maize-Hy-Ganga-101	French bean-Waghys
Root CEC		
× dry matter	-0.927**	0.419
× Ca ⁺⁺	-0.060	0.222
× Mg ⁺⁺	-0.207	0.677
× K ⁺	0.690*	-0.165
× Ca/K	-0.752**	0.237
× Total cations	0.801**	0.328

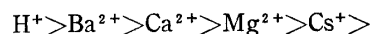
Significance: * =5 per cent level
**=1 per cent level

植物コロイドと土壌コロイド間のカチオン置換は表面現象である。この際吸着されたカチオンは植物の上部へ移行するとは限らない。多くの植物は養分を吸収する際に、開花期までならカチオン置換により吸われたカチオンは成長のために上部まで移行する。その結果根の CEC と地上部のカチオン間に相関が見出される。ある時期以後に CEC が減少するのは、多分細胞膜の厚さが増し新しい細根の伸長が止ったためであろう。

Ca, Mg, K の植物に対する生理意義は同じでない。故に最成長期以後に CEC が減少したとき、地上部のカチオン量がドンナン分布に従うとは限らない。また原子価効果は稀薄溶液で現れるのであって、肥沃土では養分のカチオン濃度は高くして原子価効果は現れない。一般に地上部のカチオン含量と根の CEC との関係には全期間を通じてドンナン分布が当てはまらないが、生長の旺盛なある時期には適用される。

3. イオンの種類と置換順位

イオンの種類による置換力の順序に対する見解は同じではない。Williams および Coleman⁴⁶⁾ はタバコ根につきアルカリ、アリカリ土金属を用いて実験した場合、ある濃度の範囲内ではカチオンの置換力は次の順序に従うと述べた。



これはカチオン置換表面においてイオン保持に関し て考えられる lyotropic order である。後に Wiklander⁴⁵⁾ は combined series における 1 価および 2 価イ

オンの位置は置換体の性質および溶液濃度により変ると述べた。Helmy および Elgabaly¹⁸⁾ も同じ原子価のイオンに関しては lyotropic series を見出さず、単に2価イオンは1価イオンよりも置換力が大きいことを知った。

なおカチオンに関連してアルカリ土壌で置換性 Na が多い場合に sodium tolerance index (収量が50%に減少した時の置換性 Na の百分率) は根の CEC の低いものは高く、CEC の高いものは低いことを Bajwa および Bhumbla¹⁹⁾ は報告した。

4 重金属の影響

Vose および Randall¹¹⁾ はイタリヤンライグラスで Al, Mn に抵抗性の大きいもの小さいものを選び、Al を含む溶液で培養試験をしたところ、抵抗性の小さい

Table 23. Cation-exchange capacity of plant roots under conditions of heavy-metal toxicity

Metal*	Oat	Tomato	Sunflower	Pea	Bean
	me/100 g. dry roots				
Control (C.E.C.)	15.6 (22.8)	33.8 (34.6)	47.2 (—)	40.5 (35.0)	36.4 (37.2)
+Ni	21.0	34.6	51.6	40.7	42.2
+Co	21.4	31.2	51.9	40.7	39.6
+Cu	18.0	28.8	49.0	32.9	33.9
+Zn	21.9	32.4	36.8	42.4	41.6
+Mn	13.1	29.8	42.7	36.3	38.9

* In each case these are means of duplicate determinations carried out on each replicate pot. Controls are therefore means of 8 determinations, the others of 4 determinations.

Obtained by electro dialysis.

ものは根の CEC が大きく減少したと報告した。

Crooke²⁾ は5種類の作物に Ni, Co, Cu, Zn, Mn を過剰に加えて根の CEC に及ぼす影響を調べた。Ni, Co, Zn で毒性が現れる場合は CEC は増加し、Mn では減少した。Table 23 に示す通りである。Cu はカラスムギ、ヒマワリでは CEC の増加を、トマト、エンドウ、インゲンでは減少を示した。これら重金属で CEC が変化しても植物体の1価、2価カチオンの量には一定の変化が見られなかった。重金属による CEC の変化はこれら重金属によってもたらされる性質の変化を伴う。たとえば Ni 害をうけたカラスムギ根はペクチンの増加が認められ、CEC の増加はこれによるものと考えられる。故に植物栄養の研究には無機、有機の色々な性質を併行して研究することが必要である。

4. 粘土との関係

粘土鉱物からの吸着につき Elgabaly および Wiklan-

der¹⁴⁾ はカオリン、ベントナイトから大麦切断根による Na, Ca の吸着を研究した。両イオン濃度、割合が等しい時、根はカオリンよりもベントナイトからの方がより多くの Ca, Na を蓄積した。摂取した Ca/Na の割合は、ベントナイトからよりもカオリンからの方が大であった。また CEC の異なる大麦、マメ根がベントナイト懸濁液から Na, Ca を摂取する割合を研究したところ、CEC の高いマメ根は Ca/Na 大きく、CEC の低い大麦根はこの比は小であった。

青木および森田²⁾ はカオリン、ベントナイトの CEC の50%Ca飽和、25%Ca 25%Kに飽和、50%Kに飽和の水懸濁液からミカン或はモモの切断根を用いて Ca, K の吸着を研究した。その結果は Table 24 に示す通りで、ミカン、モモともに Ca はカオリンからよりもベントナイトからの方が多く吸われたが、K の吸着は逆にカオリンの方がベントナイトよりも大であった。

結合エネルギーから考えると McLean および Baker²¹⁾ は CEC の高いアルファルファおよび大豆根は Ca に対して強い結合エネルギーを有し、K に対するよりも2倍の強さで結合すると述べた。また CEC の低いレッドトップでは Ca はマメ科の約半分の値を示し K は80%の程度であると報告した。

上記青木および森田²⁾ の実験では CEC の高いミカン根はこれの低いモモ根よりも多量の Ca, K を吸着した。Ca-粘土からの Ca 吸着量が、CEC の高い根の方が CEC の低い根よりも多いことは White ら¹²⁾ も実験した。さらに青木および森田²⁾ によるとミカンとモモの CEC比は3.1である。Ca 50%懸濁液からのミカンとモモの Ca 吸着比はカオリンで3.2、ベントナイで3.2、

Table 24. Adsorption of calcium and potassium by roots of orange and peach.

		Saturation degree	Amount absorbed by root lg	
			Ca	K
Kaolin	Orange	Ca 50	0.220	
		Ca 25, K 25	0.109	0.022
	Peach	K 50		0.064
		Ca 50	0.069	
Ben-tonite	Orange	Ca 25, K 25	0.033	0.011
		K 50		0.025
	Peach	Ca 50	0.243	
		Ca 25, K 25	0.141	0.017
		K 50		0.048
		Ca 50	0.074	
		Ca 25, K 25	0.039	0.007
		K 50		0.020

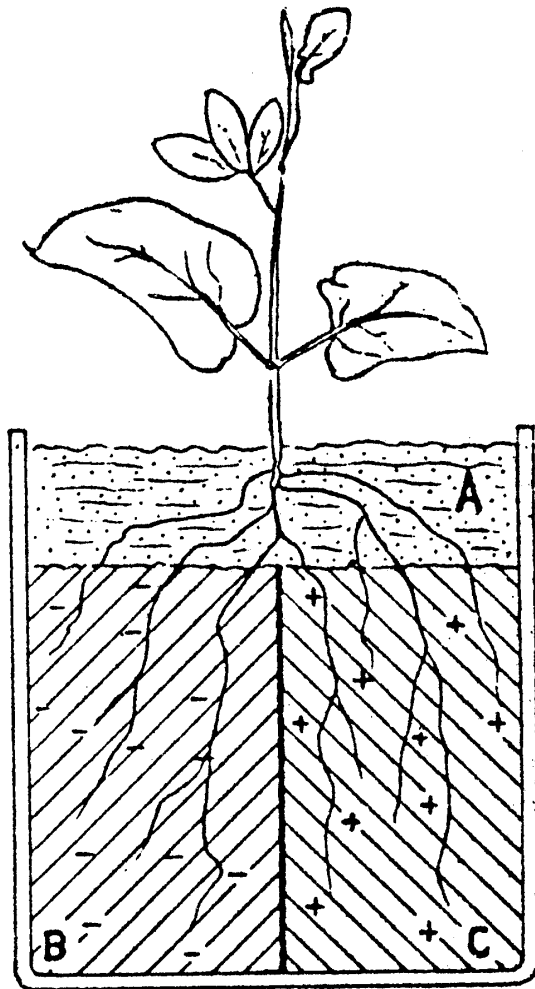


Fig. 6 Diagram of the experiment. A. Toplayer of sand. B. Compartment filled with sand mixed with an anion-loaded exchange resin. C. Compartment filled with sand mixed with a cation-loaded exchange resin.

Ca 25%K 25%の場合の同じ Ca 吸着比はカオリン3.3,

ベントナイト 3.6 となり、ほぼ CEC 比に近い比率を示した。ミカンとモモの K 吸着比は両粘土を総括すると約 2.4 となり CEC 比よりは小さかった。この場合原子価律は見られない。

根は土壤中でイオンに関しては土壤コロイドと競合する。その結果 CEC に変化を及ぼすことを Wiersum および Bakema²²⁾は Fig 6 のような装置を用いて実験した。その結果は Table 25 に示すように、根がカチオンと競合する場合には CEC が増加する。ソラマメでは種子中の貯蔵カチオンが多いために例外となったのであろう。アニオンの場合ではドンナン平衡でアニオンが apparent free space に入ることを制限されるために高い CEC は現れない。このように CEC は環境に適応して変化する。

Ⅷ む す び

根の CEC はこのように植物の養分吸収に関係が深い、しかし根の養分摂取が全部 CEC に依存するものではない。森田らの実験²³⁾においても、果樹根による粘土からのカチオン吸着で、Ca 50%飽和のカオリン、ベントナイトから吸着された Ca 量はミカン根の CEC よりは大きく、モモについても同様であった。このことは粘土から根が Ca を吸着するのは単にカチオン置換のみではなく、それ以外の機構により行はれることを示すものである。Mc Lean および Baker²⁴⁾は粘土膜電極を用いて 1 価、2 価イオンの活動度と自由結合エネルギーを測定した結果から、植物がこれらイオンを摂取する相対的の量を説明して、CEC のみでは不十分であると述べている。しかしながら根のカチオン置換は植物養分吸収の重要な要因であろうと考えられる。

Table 25. Comparison of the C.E.C. (expressed as me per 100g dry root weight) of two parts of split root systems of a single plant in two different media.

Plant species	Root medium	
	Amberlite + cation mixture	Amberlite + anion mixture
Wheat (<i>Triticum vulgare</i>)	2.2	2.0
Bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	7.6	5.4
Pea (<i>Pisum sativum</i>)	10.4	8.8
Cress (<i>Lepidium sativum</i>)	20.3	16.2
Broad bean (<i>Vicia faba</i>)	7.3	10.4
	Amberlite + Ca ⁺⁺	Amberlite + H ₂ PO ₄ ⁻
Broad bean (<i>Vicia faba</i>)	9.2	9.7
Tomato (<i>Solanum lycopersicum</i>)	4.7	4.5
	Amberlite + Mg ⁺⁺	Amberlite + SO ₄ ⁻⁻
Turnip (<i>Brassica rapa</i>)	10.7	10.2

引用文献

- 1) Ando, T., J. H. Baker, and M. Drake, (1969) : *Plant and Soil*, **31**, 473.
- 2) Aoki, A., and S. Morita, (1966) : *Soil Sci. and Plant Nutri.*, **12**, 15.
- 3) 青木・森田 (1969) : *土肥誌.*, **40**, 228
- 4) Bajwa, M.S., and D.R. Bhumbra, (1971) : *Plant and Soil*, **34**, 57.
- 5) Bartlett, R. G. (1964) : *Soil Sci.*, **98**, 351.
- 6) Brooks, S. C. (1971) : *Trans. Farady Soc.*, **33**, 1002.
- 7) Crooke, W. M. (1958) : *Soil Sci.* **86**, 231.
- 8) Crooke, W.M., A.H., Knight, and I.R. Macdonald, (1960) : *Plant and Soil*, **13**, 123.
- 9) Crooke, W.M., and A.H. Knight, (1962) : *Soil Sci.*, **93**, 365.
- 10) Devaux, H. (1916) : *Comt. Rend. Acad. Sci. Paris*, **162**, 561. 11), 23)に引用
- 11) Drake, M., J. Vengris, and W.G. Colbe, (1951) : *Soil Sci.*, **72**, 139.
- 12) Dunham, C. W., O.L. Hammer, and Asen Sam (1956) : *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.*, **68**, 556.
- 13) Elgably, M. M. and L. Wiklander, (1949) : *Soil Sci.*, **67**, 419.
- 14) Elgabaly, M.M. and L. Wiklander, (1950) : *Soil Sci.*, **70**, 419.
- 15) Epstein, E. and J.E. Legett, (1954) : *Amer. J. Bot.*, **41**, 785.
- 16) Franklin, R. E. (1966) : *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **30**, 177.
- 17) Gray, B. M., M., Drake, and W.G. Colby, (1953) : *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 235.
- 18) Helmy, A. K., and M.M. Elgabaly, (1958) : *Plant and Soil*, **10**, 78.
- 19) Helmy, A.K., and M. M. Elgabaly, (1958) : *Soil and Plant*, **10**, 93.
- 20) Huffaker, R.C. and A. Wallace, (1958) : *Soil Soc. Am. Proc.*, **23**, 392.
- 21) 位田・堀・奥田 (1958) : *土肥誌.*, **29**, 259.
- 22) Jenny, H. (1949) : *Plant Nutrition: Sympos. Univ. Wis. Press*
- 23) Keller, P. and H. Deuel, (1957) : *Z.Pflanzener-nähr. Düng. u. Bodenkn.*, **79**, 119.
- 24) Lundegardh, H. (1945) : *Arkiv. Botanik.*, **32**, 1.
- 25) Lundegardh, H. (1951) : *Leaf Analysis. Hilger and Watts*
- 26) Mane, V.B., N.K. Savant, A. K. and Shingte, (1970) : *Plant and Soil*, **33**, 113.
- 27) Mattson, S., and K.G. Larson, (1945) : *Ann. Agr. Coll. Sweden*, **12**, 222. 38)に引用
- 28) Mattson, (1948) : *Ann. Agr. Coll. Sweden*, **15**, 308. 20), 38)に引用
- 29) Mattson, S., E. Erickson, K., Vahtras, and E.G. Williams, (1949) : *Ann. Agr. Coll. Sweden*, **16**, 457. 8)に引用
- 30) McLean, E.O. and C.E. Marshall, (1948) : *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **13**, 179.
- 31) McLean, E.O., and F.E. Baker, (1953) : *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **17**, 100.
- 32) McLean, E.O., D. Adams, and R.E. Franklin Jr. (1956) : *Soil Sci. Soc. Am.*, **20**, 345.
- 33) McLean, E.O. (1957) : *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **21**, 219.
- 34) Morita, S., and A. Aoki, (1961) : *Soil Sci. and Plant Nutr.*, **7**, 8.
- 35) Mouat, M. C. H., and T.W. Walker, (1959) : *Plant and Soil*, **11**, 41.
- 37) Osterhaut, W.G. (1936) : *Bot.Rev.*, **2**, 283.
- 38) Smith, R. L., and A. Wallace, (1956) : *Soil Sci.*, **81**, 97.
- 39) Smith, R.L., and A. Wallace, (1956) : *Soil Sci.*, **82**, 9.
- 40) Smith, R. L., and A. Wallace, (1956) : *Soil Sci.*, **82**, 165.
- 41) Vose, P.B. and P.J. Randall, (1962) : *Nature*, **196**, 85.
- 42) White, R. P., M. Drake, and J.H. Baker, (1965) : *Soil Sci.*, **99**, 267.
- 43) Wiersum, L.K. and K. Bakema, (1959) : *Plant and Soil*, **11**, 287.
- 44) Wiklander, L. (1947) : *Ann. Agr. Coll. Sweden*, **14**, 1. 11)に引用
- 45) Wiklander, L. : *Chemistry of Soil* (Ed. F. E. Bear) Rheinhold 2nd ed., pp. 163-205.
- 46) Williams, D. E. and N. T. Coleman, (1950) : *Plant and Soil*, **2**, 243.

Summary

Cation exchange capacity (CEC) of root is an important property for nutrient uptake by plant. CEC of plant root is measured by means of replacement and titration. The CEC values are much higher for dicotyledons than for monocotyledons. The Donnan principle explains the differential adsorption of monovalent and divalent cations by

roots of high and low CEC. The highest CEC was found at the growing tip. Root CEC of young plant is higher than old one. CEC of root has some relation with nitrogen and cation content, and varies with amount and/or kind of heavy metal and clay mineral.