

ダイコン種子の水耕栽培過程における成分含量変化 第2報

—栽培液のちがいによる無機質類の含量—

舟木 行雄, 佐藤美恵子

Change of Constituent Content in Hydroponics of Radish Seed Part 2

—Minerals content in Comparison with Nutrient Solution—

Yukio Funaki and Mieko Satō

緒 言

植物体が種子から開花結実までの期間, 自己の体を形成していくのに必要な物質をどこから体内にとり込まれるかを科学的に最初に考えた者は Helmont であると云われているが¹⁾, 現代的理解は Lavoiser に代表される近代化学の確立以後である²⁾。その後 Saussure らによって植物栄養に関して定量的, 化学的に理解され³⁾, Liebig らにうけつがれ, さらに Sachs らの水耕法によって植物栄養 (生理) の基本が確立された⁴⁾。

植物栄養学の基本的な実験は栄養素の水溶液で植物体を生活させ, 不可欠な栄養素と過剰, 不足, 欠乏による生活変化を発見することにある。

第一報では水道水および純水を栽培液としてダイコン種子を栽培し, 栽培液による発芽, 成長ならびに無機質含量の違いを認めた⁵⁾。

本報は完全栄養素水溶液, 同液中の K 塩を Na 塩に置換した液, それらを等量混合した液および水道水を栽培液としてダイコン種子を発芽生育させ, 各栽培液による生育課程における含水量, 粗たんぱく質 (C. P) 量, 灰化物量および無機質類 (K, Na, Ca, P)₄ 量を測定し比較検討したので報告する。

実 験

1. 材 料

ダイコン種子: 大阪四十日ダイコン種子 *Raphanus sativus* L. (1983年6月採種, 発芽率 85% 以上, トキタ種苗 K. K 製)

種子 (除種皮) 1 個体の成分含量を表 1 に示す。

表 1 種子 (除種皮) 1 個体中の成分

体重量	含水量	C. P 量	灰化物量 (mg)
15.30±1.70	0.83±0.05	4.30±0.18	0.55±0.03
K	Na	Ca	P (μmol.)
2.22±0.21	0.27±0.02	1.10±0.19	3.54±0.14

平均値±標準偏差 n=10

栽培液: 調製した各種栽培液の組成と濃度を表 2 に示す。すなわち, 完全栄養素液を A 群とし, B~D 群は A 群の K 塩と Na 塩の量を変えた栽培液であり, E 群は東京都水道水を使用した。

表 2 栽培液⁶⁾

	A	B	C	D	E
基本液 (mM)					水道水 蒸発残留物 204.5ppm [基準 500ppm] K=0.05mM, Na=0.70mM, Ca=0.62mM, P=0.48mM
Ca(NO ₃) ₂	3.0	3.0	3.0	3.0	
KNO ₃	3.0	—	3.0	1.5	
NaNO ₃	—	3.0	—	1.5	
MgSO ₄	2.0	2.0	2.0	2.0	
KH ₂ PO ₄	2.0	—	2.0	1.0	
NaH ₂ PO ₄	—	2.0	—	1.0	
鉄液 (μM)					
FeCl ₃	30.8	30.8	30.8	30.8	
酒石酸	33.3	33.3	33.3	33.3	
微量元素液 (μM)					
H ₃ BO ₃	40.4	40.4	40.4	40.4	
CuCl ₂	0.3	0.3	0.3	0.3	
MnCl ₂	7.6	7.6	7.6	7.6	
Na ₂ MoO ₄	0.1	0.1	—	0.05	
K ₂ MoO ₄	—	—	0.1	0.05	
ZnCl ₂	0.7	0.7	0.7	0.7	

水道水中の定量は著者らがおこなった。

発芽床：市販プラスチック製材培用器具、内形20×14×6.5cmの槽に1.5×1.5mmの網目のサラン製網を張ったフロートを浮かばせ、槽内の液面と網が接触するもの、液量1ℓ（東北種苗K. K）20台

2. 方法

栽培法：精秤した大阪四十日ダイコン種子400個体を1単位として25単位準備し、5単位を1群としてA～Eの5群設けた。1単位ずつ25個の50ml容ビーカーに入れ、各群の栽培液を20mlずつ加えて6時間室温で浸漬した。また一方、各群の発芽床（各群4台）にはそれぞれの栽培液を1ℓ入れフロートを浮かせておいた。

また、各群の栽培液は栽培期間中交換するために必要量だけポリエチレンのビンに入れて密封して室温に保存しておいた。

浸漬完了後、各群の1単位を栽培開始時の分析試料として除き、残る4単位はそれぞれの栽培液に対応する発芽床の網上に均一になるようにまき、直射日光の当たらない室温に放置し、2日目（48時間）ごとに各群から1単

位ずつ採取して経日的な分析試料にし、8日目までおこなった。

栽培期間中の室温は23～25℃、栽培液温は21～23℃で、試料採取時ごとに新旧の栽培液の交換をおこなった。

分析法：採取した各群の各単位は細根を損なわないように取り出し種皮を除去し、外部に付着している栽培液を濾紙に吸着させて除去し、1分析項目に対しては毎回同一の個体数にして分配した。

分析項目は含水量（水分）、C. P量、灰化物量（灰分）、K, Na, CaおよびPであり、これらの分析法は第一報⁵⁾に準じ、3点ずつおこなった。

結 果

1個体の体重量、含水量、無水物量およびこれらの倍率を表3に示す。

体重量は経時的に各群とも増加していった。

栽培末期ではA群が最も多く増加していて、0時の体重量を1.0とすると倍率が最も高く、E群は増加量が最

表3 1個体中の体重量、含水量、無水物量 [mg] ()は倍率

		0	2	4	6	8 (日)
体重量	A	21.57±2.26 (1)	41.15±3.80 (1.9)	129.62±20.06 (6.0)	307.79±41.12 (14.3)	401.89±26.92 (18.6)
	B	21.81±2.10 (1)	33.39±4.90 (1.5)	135.82±12.69 (6.0)	323.18±32.04 (14.8)	353.62±25.96 (16.2)
	C	22.02±1.87 (1)	45.13±3.79 (2.0)	179.46±14.87 (8.1)	296.73±18.72 (13.5)	388.37±35.70 (17.6)
	D	22.67±2.33 (1)	46.02±3.21 (2.0)	148.44±12.30 (6.5)	281.33±16.36 (12.4)	396.85±23.59 (17.5)
	E	21.09±2.11 (1)	45.00±4.40 (2.1)	105.09±9.51 (5.0)	192.53±11.22 (9.1)	241.62±20.99 (11.5)
含水量	A	9.76±1.02 (1)	28.64±2.65 (2.9)	117.25±8.15 (12.0)	293.35±29.19 (30.1)	388.39±26.02 (39.8)
	B	9.77±0.94 (1)	22.15±1.75 (2.3)	125.02±10.28 (12.8)	311.19±25.67 (31.9)	341.03±25.04 (34.9)
	C	10.14±0.86 (1)	33.26±3.27 (3.3)	168.01±16.09 (16.6)	284.12±27.07 (28.0)	375.01±34.77 (37.0)
	D	10.27±1.06 (1)	33.95±3.34 (3.3)	138.06±12.83 (13.4)	268.81±24.74 (26.2)	383.12±22.08 (37.3)
	E	8.12±0.81 (1)	32.48±3.18 (4.0)	93.40±8.12 (11.5)	180.86±17.93 (22.3)	230.53±22.57 (28.4)
無水物量	A	12.77±0.75 (1)	12.24±0.95 (1.0)	12.01±0.68 (0.9)	13.21±0.82 (1.0)	13.89±0.45 (1.1)
	B	12.80±1.23 (1)	13.30±1.18 (1.0)	11.84±1.13 (0.9)	13.09±1.11 (1.0)	12.80±1.13 (1.0)
	C	12.05±1.20 (1)	13.25±1.14 (1.1)	12.18±0.95 (1.0)	14.25±1.01 (1.2)	13.79±0.31 (1.1)
	D	12.57±1.30 (1)	11.69±1.48 (0.9)	12.93±0.86 (1.0)	12.67±1.26 (1.0)	14.93±1.38 (1.2)
	E	12.31±1.19 (1)	11.77±0.45 (1.0)	11.89±1.42 (1.0)	11.46±0.57 (0.9)	11.71±1.06 (1.0)

平均値±標準偏差 n = 3

表4 1個体中のC、P量と灰化物量の変化〔mg〕()は倍率

		0	2	4	6	8 (日)
C. P 量	A	3.37±0.33 (1)	3.58±0.22 (1.1)	3.67±0.32 (1.1)	4.71±0.41 (1.4)	4.83±0.40 (1.4)
	B	3.91±0.19 (1)	3.86±0.26 (1.0)	3.72±0.32 (1.0)	4.17±0.40 (1.0)	4.81±0.40 (1.1)
	C	3.38±0.29 (1)	4.19±0.31 (1.1)	4.23±0.13 (1.1)	4.73±0.38 (1.2)	4.61±0.38 (1.2)
	D	4.23±0.28 (1)	3.65±0.26 (0.9)	4.40±0.34 (1.0)	4.79±0.25 (1.1)	4.86±0.16 (1.2)
	E	3.84±0.29 (1)	3.19±0.33 (1.1)	3.15±0.30 (0.8)	3.23±0.33 (1.1)	3.16±0.19 (0.8)
灰化物量	A	0.31±0.02 (1)	0.74±0.06 (2.4)	1.15±0.12 (3.7)	2.68±0.14 (8.6)	3.67±0.25 (11.8)
	B	0.31±0.03 (1)	0.61±0.05 (2.0)	1.36±0.07 (4.4)	2.45±0.23 (7.9)	2.34±0.02 (7.5)
	C	0.41±0.03 (1)	0.78±0.03 (1.9)	1.74±0.07 (4.2)	2.43±0.21 (5.9)	3.40±0.17 (8.3)
	D	0.49±0.04 (1)	0.78±0.07 (1.6)	1.48±0.12 (3.0)	2.49±0.22 (5.1)	2.89±0.24 (5.9)
	E	0.44±0.03 (1)	0.65±0.04 (1.5)	1.03±0.06 (2.3)	1.81±0.15 (4.1)	1.85±0.13 (4.2)

平均値±標準偏差 n = 3

も少なく倍率も最も低かった。

含水量も経時的に増加しているが、栽培中期以後は体重増加にともなって急速に増加し、倍率も体重増倍率の2倍以上を示している。

これは、栽培液中の根が水と無機栄養素を吸収し、栽培液外では有機化合物を生合成して、それぞれの成長は互に他の成長を律することになるが、本実験の場合の成長は直射日光を避けているので主に根からの吸収で成長しているとみなしうる⁹⁾。したがって、無機栄養素組成の完全な栽培液の群が最も成長がよい結果を示した。

浸透的水輸送は細胞液の浸透圧が主に K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- などの無機イオンによって起るが、植物体の要求する無機イオンとの兼合いが最もよく釣り合った栽培液が完全栽培液の要素の一つであると考えられる⁹⁾。

無水物量は各群とも大差が認められなかったが、E群だけがわずかに減少していった。これは、栽培液が水道水なので無機栄養素の不足から吸収量より消費量の方が多かったためと思われる。

1個体中のC、P量と灰化物量およびこれらの倍率を表4に示す。

C、P量はE群を除いた群はほぼ同程度に増加していった。これはA～D群の栽培液中に窒素源が同量含まれていてC、Pの生合成能に大きな差がなかったこと、また、E群の栽培液には窒素がほとんど含まれていないため増加できなかったことが考えられる。

本実験では窒素源をすべて硝酸塩としたが、硝酸の植物体内移動において、Kが随伴カチオンとして重要な役

割を果している^{9),10)}。

灰化物量はいずれの群も増加していった。栽培末期ではA群が最も増加量が多く、倍率も最も高くなっていた。このことは、無機栄養素には互に吸収、移動、反応の促進作用と拮抗作用があるが、A群栽培液は促進作用の方が強かったことと思われる¹¹⁾。

無水物中に占めるC、Pと灰化物の割合を表5に示す。

C、P量の無水物量に占める割合はA、B、C群は上昇していったが、D群は変化がみられず、E群は下降していった。

灰化物量の無水物量に占める割合は、いずれの群も上昇していき、栽培末期ではA群が最も高くE群が最も低

表5 無水物中にしめるC、P量と灰化物量の割合(W/W%)

		0	2	4	6	8 (日)
C. P 量	A	26.39	29.25	30.56	35.65	34.77
	B	30.55	29.02	31.42	31.86	37.58
	C	31.78	31.62	34.73	33.19	33.43
	D	33.65	31.22	34.03	37.81	32.55
	E	31.19	27.10	26.49	28.18	26.99
灰化物量	A	2.42	6.05	9.58	20.29	26.42
	B	2.42	4.59	11.49	18.72	18.28
	C	3.40	5.89	14.29	17.05	24.66
	D	3.90	6.67	11.45	19.65	19.36
	E	3.57	5.52	8.66	15.79	15.80

かった。これは有機化合物の生合成よりも無機イオンの吸収の速度が高かったためと考えられる。また、呼吸による時機化合物の消費も考え合せる¹²⁾。

1 個体中の K, Na, Ca および P 量を表 6 に示す。

K 量は B 群を除いて増加していった。B 群の栽培液は無 K 液なので材料種子中の K 量だけの範囲の値である。また、E 群の栽培液の K 濃度は非常に低いためわずかしき吸収されない (表 2)。

K の吸収については KCl 濃度を 0.002mM から 50mM まで変化させた培地からの K の吸収速度をみると、0.2~0.5mM 段階を境として Michaelis-Menten kinetics¹³⁾ 様のパターン〔二元的 (メカニズム I, メカニズム II)〕があることが明らかにされている。すなわち、0.005~0.2 mM (メカニズム I) では Michaelis-Menten 式の適合性、親和性、イオン選択性がきわめて高く、0.5 mM 以上 (メカニズム II) ではメカニズム I の逆であることが認められている¹⁴⁾。

本実験の栽培液では E 群がメカニズム I に、A, C, D 群はメカニズム II に属している。

また、栽培液中の K 濃度に従って個体中の含量が示されていた。

Na 量は C 群を除いた各群が増加していった。

Na は植物の必須元素¹⁵⁾ ではないが、非常によく吸収される。K 量と Na 量を栽培末期と比較すると、C 群の栽培液は無 Na 液で、B 群のそれは無 K 液であり、C 群の栽培液の K 濃度と B 群の栽培液の Na 濃度は同モル濃度になっているにもかかわらず、材料種子の含量を差し引いても C 群の K 量の方が多く含有されていた。

また、D 群の栽培液は K と Na の濃度が等しかったにもかかわらず K が多く含有されていた。

植物は自らの生活に必須とする元素を外界から選択的に取り込むと同時に、非必須元素でも有害である Cd さえも吸収するという矛盾した機構を合せもっている。これらのことは現在解明されていない^{16), 17)}。

Ca 量は各群とも増加していった。E 群を除いた各群の栽培液の Ca 濃度は同一であるが、C 群は特に多かった。

Ca が他の元素におよぼす影響については、Ca がかなり広い濃度範囲にわたって K, Rb, Br の吸収をいちじくしく促進するという報告がある¹⁸⁾。

P 量は E 群にほとんど変化がみられなかったが、その他の群は増加していった。

P の吸収量は栄養素が不足していない場合、K の吸収量の 1/5~1/3 であった。これは K が P より数倍高い速度で吸収されているためであると思われる¹⁹⁾。

表 6 1 個体中にしめる K, Na, P および Ca 量の変化 ($\mu\text{mol.}$)

		0	2	4	6	8 (日)
K	A	1.69 \pm 0.05	2.38 \pm 0.05	7.23 \pm 0.62	21.08 \pm 2.00	22.90 \pm 1.92
	B	1.74 \pm 0.10	1.67 \pm 0.10	1.87 \pm 0.18	2.03 \pm 0.05	1.97 \pm 0.18
	C	1.82 \pm 0.15	2.21 \pm 0.13	11.90 \pm 0.74	20.77 \pm 1.46	24.54 \pm 1.97
	D	2.03 \pm 0.15	2.51 \pm 0.21	6.51 \pm 0.59	11.00 \pm 1.00	16.85 \pm 1.26
	E	1.92 \pm 0.10	1.95 \pm 0.13	2.49 \pm 0.15	2.49 \pm 0.03	3.00 \pm 0.18
Na	A	0.22 \pm 0.00	0.39 \pm 0.00	0.43 \pm 0.04	0.78 \pm 0.04	0.70 \pm 0.09
	B	0.26 \pm 0.00	0.35 \pm 0.00	4.39 \pm 0.43	15.22 \pm 0.39	20.91 \pm 0.39
	C	0.22 \pm 0.00	0.20 \pm 0.00	0.22 \pm 0.01	0.21 \pm 0.02	0.21 \pm 0.01
	D	0.26 \pm 0.00	0.30 \pm 0.00	1.22 \pm 0.04	6.43 \pm 0.57	11.04 \pm 0.87
	E	0.26 \pm 0.00	0.43 \pm 0.00	2.39 \pm 0.17	2.83 \pm 0.22	6.35 \pm 0.48
Ca	A	1.08 \pm 0.07	0.75 \pm 0.05	1.69 \pm 0.10	3.60 \pm 0.30	3.97 \pm 0.35
	B	1.18 \pm 0.03	0.75 \pm 0.05	1.62 \pm 0.13	4.14 \pm 0.28	3.40 \pm 0.30
	C	1.00 \pm 0.05	0.68 \pm 0.03	1.80 \pm 0.15	2.97 \pm 0.28	5.07 \pm 0.45
	D	1.08 \pm 0.03	0.83 \pm 0.08	1.62 \pm 0.08	3.45 \pm 0.30	4.52 \pm 0.38
	E	1.20 \pm 0.10	0.93 \pm 0.08	1.50 \pm 0.05	2.05 \pm 0.08	3.22 \pm 0.28
P	A	3.90 \pm 0.26	4.00 \pm 0.26	5.35 \pm 0.26	5.84 \pm 0.39	6.29 \pm 0.42
	B	4.19 \pm 0.29	3.62 \pm 0.29	4.29 \pm 0.29	5.35 \pm 0.45	5.90 \pm 0.45
	C	4.29 \pm 0.35	4.16 \pm 0.19	4.71 \pm 0.35	5.48 \pm 0.42	7.13 \pm 0.39
	D	4.10 \pm 0.35	4.48 \pm 0.42	4.48 \pm 0.35	5.61 \pm 0.39	7.03 \pm 0.48
	E	4.23 \pm 0.23	4.00 \pm 0.26	4.13 \pm 0.32	3.32 \pm 0.16	4.00 \pm 0.16

平均値 \pm 標準偏差 n = 3

灰化物量に占める K, Na, Ca および P 量の重量割合を表 7 に示す。

K と Na は栽培液中の K と Na の濃度によって上昇する群と下降とがあった。Ca と P は E 群を除いた各群栽培液中の Ca と P の濃度が等濃度であるが両元素ともいずれの群も下降していった。これらは 1 価のカチオンは吸収されやすく、多価のカチオン、アニオンは吸収されにくいことに原因があると考え²⁰⁾。

表 7 灰化物量に占める K, Na, Ca, P 量の割合 (W/W %)

		0	2	4	6	8 (日)
K	A	21.29	12.57	24.52	30.67	24.33
	B	21.94	10.66	5.37	3.22	3.29
	C	17.32	11.03	26.67	33.33	28.15
	D	16.12	12.56	17.16	17.23	22.73
	E	17.05	11.69	9.42	4.36	6.32
Na	A	1.61	1.22	0.87	0.67	0.44
	B	1.94	1.31	7.43	14.29	20.56
	C	1.22	0.59	0.29	0.20	0.14
	D	1.22	0.90	1.89	5.94	8.79
	E	1.36	1.54	5.34	3.59	7.89
Ca	A	13.87	4.05	5.91	5.37	4.33
	B	15.16	4.92	4.78	6.78	5.81
	C	9.76	3.46	4.14	4.90	5.97
	D	8.78	4.23	4.39	5.54	6.26
	E	10.91	5.69	5.83	4.53	6.97
P	A	39.03	16.76	14.43	6.75	5.31
	B	41.94	18.36	9.78	6.78	7.82
	C	32.44	16.54	8.39	7.00	6.50
	D	25.92	17.82	9.39	6.99	7.54
	E	29.77	19.08	12.43	5.69	6.97

要 約

完全栄養液 (A 群), A 群の K 塩を Na 塩に置換した無 K 液 (B 群), A 群の $\text{Na}_2\text{M}_2\text{O}_4$ を K 塩にした無 Na 液 (C 群), B 群液と C 群液を同量混合した液 (D 群) および水道水 (E 群) の 5 種を栽培液として大阪四十日ダイコン種子を 8 日間生育させた結果 1 個体中の成分は,

1. 体重量の増加は A 群が最も多く, E 群は最も少なかった。
2. 含水量の増加は体重量の増加にともなっていた。
3. 無水物量は各群とも大きな変化はみられなかった。E 群のみがわずかに減少していった。
4. 粗たんぱく質量は E 群はわずかに減少していったが他群はほぼ同程度に増加していった。

5. 灰化物量は各群とも増加していったが, 栽培末期では A 群が最も多かった。
6. K 量は栽培液中の K 濃度にしたがって増量していった。B 群は無 K 液であるため極度に少なかった。
7. Na 量は C 群が無 Na 液のため変化がみられなかったが他群は栽培液の Na 濃度にしたがって増加していった。
8. Ca 量は各群とも増加していった。A~D 群の栽培液中の Ca 濃度は同一にもかかわらず栽培末期では C 群が特に多かった。
9. P 量は E 群が減少の傾向にあり, 他群は大差なく増加していった。P 量は他の元素量に比較して最も増加量が少なかった。

文 献

- 1) Helmont, Jean Baptiste van: *Ortus Medicinae*, 108~109, Amsterdam (1648)
- 2) Lavoisier, Antoine Laurent: *Opusculs physiques et chimiques* (1773); *Traité élémentaire de chimie* 2. (1789)
- 3) Saussure, Nicolas Théodore de: *Recherches Chimiques sur la végétation* (1804)
- 4) Sachs, J. uon: *Vorlesungen über Pflanzen Physiologie*, Wilhelm Engelmann, Leipzig, P. 341 (1882)
- 5) 舟木ら: 駒沢女子短期大学研究紀要, 17, 15 (1984)
- 6) 田中亮平, 田崎忠良: 実験植物生理生態学実習, 養賢堂, P. 64~66 (1983)
- 7) Thornley, J. H. M.: *Symp. Soc. Exp. Biol.*, 31, 367 (1977)
- 8) 高橋英一: 植物生理学. 朝倉書店, 第 5 巻, P. 18~19 (1981)
- 9) Ben Zioni, A., Vaadia, Y. & Lips, S. H.: *Physiol. Plant*, 24, 288 (1971)
- 10) Mengel, K. & Simic, R.: *Physiol. Plant*, 28, 232 (1973)
- 11) 田中 明: 土肥誌. 41, 457 (1970)
- 12) 山本幸男: 植物生理学, 朝倉書店. 第 3 巻, P. 14~25 (1981)
- 13) Michaelis, L. & Menten, M. L.: *Biochem. Z.* 49, 33 (1913)
- 14) Epstein, E.: *Nature*, 212, 1324 (1966)
- 15) 鈴木米三ら: 植物生化学. 理工学社., P. 122~123 (1978)
- 16) 飯村康二ら: 北陸農試報告, 21, 95 (1978)
- 17) 平田 照ら: 植物生理学, 朝倉書店, 第 5 巻, P. 120~122 (1981)
- 18) Viets, F. C.: *Plant Physiol.*, 19, 466 (1944)
- 19) 平田 照ら: 植物生理学. 朝倉書店, 第 5 巻, P. 141~143 (1981)
- 20) 舟木行雄: 駒沢女子短期大学研究紀要, 第 9 巻, P. 3~9 (1975)