

3種の栽培液によるダイズ種子の水耕栽培過程における窒素，カリウム，リン量および二酸化炭素排出量の変化

舟木 行雄，高橋奈津子

Changes in Amount of Nitrogen, Potassium, Phosphorus and Ejective Carbondioxide in Soybean Seed during Hydroponics with Three kinds of Nutrient Solution

Yukio Funaki, Natsuko Takahashi

緒 言

一般に，種子は，ある温度のもとで，ある量以上の水を吸収すると，種子中の酵素が活性し，貯蔵物質の加水分解が促進してエネルギーの発生によって発芽することは周知のことであり¹⁾，生育のための栄養素は大部分が無機栄養素であって，その吸収と輸送の機構や体構成成分などについては，植物生理学や植物生化学分野で広く研究されている²⁾。

舟木らは，先に塩類の種類と濃度の異なる栽培液でダイコン種子を発芽，生育させ，その間における各種元素の動向について，2，3の報告をした^{3), 4), 5)}。

本報は，ダイズ種子を，3種の異なる栽培液で発芽，生育させ，その期間における，窒素(N)，カリウム(K)，リン(P)の含量と，二酸化炭素(CO₂)排出量がどのように変化するか実験を試み，その結果を比較検討したので報告する。

実 験

材料

ダイズ種子 *Glycine max* L. Merrill：市販の種子(トキタ種苗 K.K 製，大袖振枝豆種，1985年9月採種，発芽率80%以上)を入手し，その中から1個体重0.31~0.38gの種子を選択して実験材料とした。材料ダイズ種子の成分を表1に示す。

栽培液：脱イオン水(オルガノ K.K 製，純水製造装置 MA 型より，比抵抗 $500 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ のものを採取した)，水道水(東京都水道水)および栄養液(完全配合⁶⁾，著者らの調製)。表2に水道水と栄養液の組成を示す。

表1 材料ダイズ種子の成分

無 水 物	92.6± 2.2 g
灰 化 物	5.9± 0.1 g
N	430.0±34.0mmol
K	42.3± 1.9mmol
P	15.9± 1.4mmol
灰化物/無水物	6.4%
K/灰化物	28.0% (W/W)
P/灰化物	8.4% (W/W)
N/無水物	6.5% (W/W)
K/無水物	1.8% (W/W)
P/無水物	0.5% (W/W)

表2 栄養液組成

N . S		C . W
基本液 (mM)		水道水 蒸発残留物 204.5ppm [基準 500 ppm] K=0.05 mM, Na=0.70 mM, Ca=0.62 mM P=0.48 mM
Ca(NO ₃) ₂	3.0	
KNO ₃	3.0	
MgSO ₄	2.0	
KH ₂ PO ₄	2.0	
鉄液 (μM)		
FeCl ₃	30.8	
酒石酸	33.3	
微量元素液 (μM)		
H ₃ BO ₃	40.4	
CuCl ₂	0.3	
MnCl ₂	7.6	
NaMoO ₄	0.1	
ZnCl ₂	0.7	
蒸発残留物	1323 ppm	

方法

栽培法：3種の栽培液で栽培する種子のグループを、それぞれP.W区(脱イオン水)、C.W区(水道水)およびN.S区(栄養素液)とした。

栽培日数ごとに20個体を区分し、1個体ずつ体重を測定した種子を各専用の容器で、それぞれの栽培液に3時間浸漬した後、外径16mmの試験管の口に種子を安定させるためにポリエチレン滴ビン(胴部外径20mm)の胴部を横切断して作製したものを付設して発芽床(図1)とし、この中に各栽培液を満し、1個体ずつ浸漬した液と同一の栽培液が入っている発芽床に移殖し、栽培開始時とした。

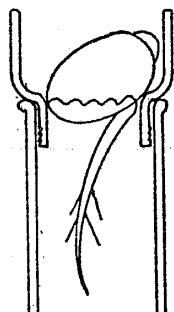


図1 発芽床の構造略図

栽培環境は、直射日光を避けた25~28°Cの室内であり、毎朝7時に点灯、毎夕6時に消灯した。

栽培日数は、栽培開始時を0日として17日間であったが、P.W区は、発育不全、枯死したため13日間となった。

採取法：各時点における採取個体数は、各区20個体中から、CO₂測定用、KとP測定用、N測定用、無水物と灰化物測定用(灰化物は、無水物測定後、同一試料で測定)の各測定項目につき3個体を採取した。

採取日数は、0日と、1日以後は隔日とした。

各時点で採取した個体は、1個体ずつ種皮を除いて体重を測定したが、0日と1日のCO₂排出量を測定する個体については、この時期に種皮を除くと子葉が剝離する可能性があるため種皮を除かず測定した。

分析項目および分析法

無水物：105°C常圧乾燥法⁷⁾

灰化物：直接灰化法⁸⁾

N：ケルダール法⁹⁾

P、K：硝酸一過塩素酸による湿式灰化¹⁰⁾後、Kは炎光光度計(東京光電K.K製、ANA.10AL)により測定¹¹⁾、Pはゴモリー法¹²⁾

CO₂排出量：144×109×72mmのプラスチック製密封容器に試料と試薬を入れ、3時間における呼吸簡易測定法¹³⁾、器内温度25~26°C。

結果

体重、無水物量および灰化物量の変化を表3に示す。各区の栽培末期で体重を比較すると、N.S区が最も増加量が多かった。

無水物量は各区ともやや減少の傾向がみられた。これは、栽培液中に種子の成分が溶出することと、呼吸による糖質や脂質の消費が原因であると考ええる。

体重における無水物量の割合は、成長が進むにつれて低くなって、含水量の増加に支配されている。

灰化物量は、P.W区が特に減少量が多く、C.W区はやや減少した。N.S区は、栽培初期はやや減少したが、中期から増加した。

したがって、無水物中に占める灰化物量の割合は、P.W区は非常に低下、C.W区はやや低下し、N.S区は上昇した。

3時間におけるCO₂の排出量変化を表4に示す。

1個体でみると、P.W区は5日目、C.W区とN.S区は11日目に最も多く排出したが、P.W区の最大排出量よりC.W区とN.S区の最大排出量の方が多かった。また、栽培3日目までは、P.W区が他区より多く、その後はC.W区が最も多かった。

単位重量当りでみると、各区に1個体当たり程大きな差はみられなかった。

N、KおよびPの含量変化を表5に示す。

N量は、P.W区とC.W区はやや減少し、N.S区は、わずかに増加した。

K量は、P.W区は減少し、C.W区は大きな変化はみられず、N.S区は著しく増加し、栽培末期では初期の1.8倍に達した。

P量は、P.W区、C.W区とも大きな変化はみられなかったが、N.S区は増加していった。

無水物中に占めるN、KおよびPの割合を表6に示す。Nは、P.W区、C.W区とも大きな変化はみられなかったが、N.S区はやや上昇した。

Kは、P.W区は低下し、C.W区は栽培9日目から上昇し、N.S区は終始上昇した。

Pは、P.W区は大きな変化はなかったが、C.W区はやや上昇し、N.S区は最も上昇し、17日目には栽培開始時の約2倍に達した。

灰化物中に占めるKおよびPの割合を表7に示す。

KとPは各区とも経時的に高くなる傾向がみられた。特にP.W区は、灰化物量が著しく減少したため、KとP量の変化がなかったため、他区と比較して最も高い値

表 3 1 個体の体重, 無水物および灰化物量の変化

		0	1	3	5	7	9	11	13	15	17日
体 重 (mg)	P.W	554 ± 19	733 15	856 21	1041 61	1306 78	1752 44	2099 84	2120 62		
	C.W	543 ± 37	738 22	766 84	1312 48	1679 55	2123 134	2385 126	2552 36	2630 60	2762 191
	N.S	526 ± 32	707 35	780 42	940 73	1383 77	2068 56	2491 25	2864 42	3038 46	3224 62
無 水 物 (mg)	P.W	279 ± 9	278 15	277 12	282 12	248 14	283 11	245 21	251 13		
	C.W	274 ± 14	286 21	268 10	256 6	281 16	266 5	262 8	247 11	235 22	233 11
	N.S	293 ± 19	284 14	287 4	277 13	267 15	256 15	250 8	231 8	233 6	246 15
無水物/体重 (%)	P.W	51.39 ± 3.62	37.92 2.04	32.32 1.63	27.13 2.02	18.98 1.62	16.17 1.50	11.69 0.72	11.84 0.76		
	C.W	50.55 ± 3.22	38.76 1.98	35.02 1.60	19.54 1.62	16.76 1.43	12.55 1.00	10.98 0.82	9.69 0.42	8.92 0.41	8.42 0.63
	N.S	55.80 ± 3.68	40.14 1.80	36.74 1.72	29.47 1.92	19.29 1.22	12.35 0.88	10.03 0.63	8.06 0.36	7.68 0.44	7.64 0.64
灰 化 物 (mg)	P.W	15.7 ± 1.0	15.0 0.4	13.6 0.4	12.5 0.6	11.2 0.5	11.1 0.8	9.6 0.4	9.0 0.6		
	C.W	15.9 ± 1.6	15.5 1.1	13.8 0.4	13.4 0.2	13.3 1.3	13.3 1.0	13.2 1.1	13.2 0.8	13.1 0.9	13.0 1.2
	N.S	17.0 ± 1.2	15.2 1.2	15.6 1.4	15.6 0.7	17.9 1.0	18.4 0.6	19.5 1.0	20.9 1.8	22.0 1.3	23.1 0.6
灰化物/無水物 (%)	P.W	5.62 ± 0.32	5.40 0.31	4.91 0.32	4.43 0.14	4.52 0.28	3.92 0.20	3.91 0.19	3.59 0.18		
	C.W	5.79 ± 0.22	5.31 0.28	5.15 0.26	5.23 0.36	4.73 0.30	4.99 0.21	5.04 0.26	5.34 0.26	5.58 0.27	5.59 0.32
	N.S	5.79 ± 0.26	5.36 0.40	5.45 0.36	5.63 0.32	6.71 0.42	7.20 0.46	7.80 0.32	9.06 0.63	9.43 0.55	9.38 0.44

n = 3 平均値 ± S.D

表 4 3 時間における 1 個体および 1 g 当りの CO₂ の排出量変化 (μmol)

		0	1	3	5	7	9	11	13	15	17日
1 個 体	P.W	11 ± 1	11 1	17 1	26 1	24 0	23 1	18 1	13 1		
	C.W	7 ± 1	10 1	16 0	27 1	29 1	28 1	30 1	24 1	18 1	21 2
	N.S	8 ± 1	8 1	13 1	23 2	26 1	23 1	30 1	23 0	19 1	13 2
1 g	P.W	19 ± 1	16 1	20 1	25 1	19 1	13 1	9 0	6 0		
	C.W	14 ± 1	14 1	21 1	21 1	17 1	13 1	12 1	9 1	7 0	8 0
	N.S	15 ± 1	11 1	17 1	25 1	19 1	11 0	12 1	8 0	6 0	4 0

n = 3 平均値 ± S.D

表5 1個体中のN, KおよびP量の変化

		0	1	3	5	7	9	11	13	15	17日
N (mmol)	P.W	1.25 ± 0.04	1.31 0.04	1.17 0.04	1.30 0.12	1.19 0.01	1.16 0.02	1.17 0.09	1.19 0.03		
	C.W	1.25 ± 0.03	1.27 0.04	1.26 0.04	1.23 0.11	1.24 0.08	1.21 0.11	1.16 0.02	1.17 0.04	1.11 0.04	1.10 0.03
	N.S	1.27 ± 0.08	1.26 0.09	1.31 0.12	1.30 0.10	1.27 0.08	1.35 0.08	1.33 0.03	1.33 0.09	1.36 0.06	1.35 0.01
K (μmol)	P.W	117 ± 3	115 8	108 9	112 0	97 6	105 10	103 3	98 3		
	C.W	115 ± 5	110 5	110 6	110 7	112 8	114 9	111 8	107 3	112 8	115 1
	N.S	115 ± 8	111 6	115 5	133 11	135 2	151 13	187 17	190 16	197 15	209 7
P (μmol)	P.W	55 ± 5	50 3	51 2	51 3	50 4	53 5	52 5	53 1		
	C.W	58 ± 1	57 2	55 5	58 5	59 4	55 1	56 2	54 3	58 4	58 5
	N.S	58 ± 5	57 4	63 5	72 4	72 2	76 5	82 7	84 6	90 5	95 2

n = 3 平均値 ± S.D

表6 無水物中のN, KおよびPの割合 (% W/W)

		0	1	3	5	7	9	11	13	15	17日
N	P.W	6.26	6.60	5.92	6.44	6.72	5.73	6.68	6.64		
	C.W	6.38	6.22	6.58	6.72	6.17	6.36	6.20	6.62	6.62	6.62
	N.S	6.06	6.22	6.40	6.57	6.66	7.40	7.45	8.07	8.16	7.67
K	P.W	1.63	1.62	1.52	1.55	1.53	1.45	1.64	1.52		
	C.W	1.64	1.50	1.60	1.67	1.55	1.67	1.65	1.69	1.86	1.93
	N.S	1.53	1.53	1.57	1.87	1.98	2.31	2.92	3.21	3.29	3.31
P	P.W	0.61	0.56	0.57	0.56	0.63	0.58	0.66	0.65		
	C.W	0.66	0.62	0.64	0.70	0.65	0.64	0.66	0.68	0.77	0.77
	N.S	0.61	0.62	0.68	0.80	0.84	0.92	1.02	1.13	1.20	1.20

n = 3

表7 灰化物中のKおよびPの割合 (% W/W)

		0	1	3	5	7	9	11	13	15	17日
K	P.W	29.04	29.93	30.96	34.96	33.75	36.94	41.88	42.44		
	C.W	28.24	27.68	31.09	32.01	32.86	33.46	32.80	31.59	33.36	34.54
	N.S	26.41	28.49	28.78	33.27	29.44	32.01	37.38	35.45	34.91	35.28
P	P.W	10.89	10.33	11.62	12.64	13.84	14.77	16.77	18.22		
	C.W	11.32	11.42	12.39	13.43	13.76	12.86	13.18	12.65	13.74	13.85
	N.S	10.59	11.64	12.50	14.29	12.46	12.83	13.03	12.44	12.68	12.77

n = 3

になった。

考 察

一般に、植物体中のKは、炭素、水素、窒素に次ぐ高い含有率である。

また、植物界では、アルカリ金属中、Kのみが普遍的に必須性が確認されている元素である。

Kに対してNaは、ある種の植物体で必須であることが認められており、必須性に確証がない植物体においても、栽培液中のK濃度が低い場合には、Naを加えることによって生育が促進される場合がある¹⁴⁾。

呼吸に関しては、ダイズ根は嫌氣的条件下に生活した当初から呼吸活性が非常に低く、この条件下に一定期間生活させると、その根に破生通気組織が環境に適應して発達し、順応していく¹⁵⁾。

KとPの吸収と呼吸の関係をみると、Kの吸収の場合、栽培液中の酸素濃度の影響は、いずれの植物根においても通気中の酸素分圧が3%以上になれば、ほぼ一定の値を示し、100%に至るまで不変であるといわれている¹⁶⁾。

P吸収の場合、栽培液のP濃度が 10^{-4} Mにおいて、酸素分圧が3%までをオオムギ根で測定した結果、1/2のVmax (maximum Velocity)を与える酸素分圧は0.3%であり¹⁷⁾、また、 10^{-5} Mの KH_2PO_4 栽培液からのオオムギ根でのP吸収は、6時間における根への集積は、酸素分圧が0%であってもほとんど影響されず、さらに、酸素欠乏条件に一定期間生活させて順応すれば、P吸収の低下はみられないといわれている¹⁸⁾。

一方、イオン吸収における CO_2 の影響については、土壤中の気相には根自体、あるいは土壤中の微生物の呼吸によって、 CO_2 濃度は一般的には大気中より高く¹⁹⁾、この CO_2 の一部は、根のPEPカルボキシラーゼあるいは、リンゴ酸酵素などの関与によって有機酸として同化され、その結果として、 K^+ をはじめカチオン吸収を促進することが報告されている²⁰⁾。

植物体中におけるKの膜輸送に関しては、動物の場合の能動輸送における $\text{Na}^+-\text{K}^+-\text{ATPase}$ ²¹⁾と同様な考え方に基づいて、植物細胞から Na^+ と K^+ によって活性化される酵素の抽出分離がおこなわれている。細胞を破碎した後、ミクロソーム分画、膜に富んだ分画、原形質膜分画などから Na^+ と K^+ により活性化されるATPaseが抽出されているが、 Na^+ と K^+ の能動輸送に関与している証明はない^{22), 23)}。

しかし、 K^+-ATPase と K^+ 輸送に関しては、マカラスムギの根から採取した原形質膜にあるATPaseが K^+

により活性化され、その濃度依存性は K^+ のフラックスの依存性とよく一致すること、また、オオムギ、コムギ、トウモロコシの根では、 K^+ 依存性ATPase活性が K^+-influx とほとんど同様であることから、 K^+-ATPase が K^+ の輸送に関与していることを示している^{24), 25)}。

導管内の体液中のNは、アミノ酸、ウレイド、硝酸、アンモニアなどの形態になって移行している。一般にはアスパラギン、グルタミンなどが有機態として多く占めている²⁶⁾。

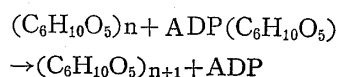
このことに関し、一定濃度の硝酸を種々の植物体に与えると、溢泌液中の各種窒素化合物の割合は植物種によって大差があり、オナモミやハコベでは硝酸態Nが90%以上を占めているのに対して、ダイコンやエンドウでは有機態Nが60%以上を占めていることである²⁷⁾。

一般に有機態Nを多く含む植物の根には、硝酸還元酵素活性が非常に高く、硝酸態Nを多く含む根には同酵素活性が低いという相関性が認められている。

導管内の体液中のリン酸移行形態の一部は、ホスホリルコリンなど有機態であるともいわれ、また、正リン酸など無機態であるともいわれている。

無機リン酸は、根で吸収されると、その大部分がスクレオチド、糖リン酸エステルなど有機化され、皮膚や中心柱内でも、多くの有機リン酸化合物として存在するが、溢泌液中では単一の無機リン酸として存在している^{28), 29)}。

植物体中のKの最も重要な生理作用の1つは、デンプン合成における作用である。Kはデンプン合成における最終段階の反応



に関与するデンプン合成酵素を活性化する³⁰⁾。

さらに、解糖過程においては、Kによってピルビン酸キナーゼの活性化がなされる³¹⁾。

窒素代謝とKの関係は、まず、根から吸収された $-\text{NO}_3^-$ の体内移動において、Kが随伴カチオンであるという意見がある。それによると、 KNO_3 溶液からの $-\text{NO}_3^-$ 吸収量は、K吸収量より多いが、茎部を切断して得た溢泌液中の $-\text{NO}_3^-$ 濃度とK濃度は、ほぼ等濃度になっていて、この $-\text{NO}_3^-$ はKとともに葉部に達し、そこで還元されることに伴ってリンゴ酸塩が生産され、リンゴ酸塩はリンゴ酸K塩として葉部から根部へ移動して、そこで酸化分解され、Kは再度 $-\text{NO}_3^-$ の随伴カチオンとして地上部へ移動するという³²⁾。また、栽培液中でKの存在が $-\text{NO}_3^-$ の体内移動を促進することを観察している³³⁾。

また、K欠乏によって窒素代謝に異常をきたし、アミノ酸やアミド類（グルタミン、アスパラギンなど）が植物体内に集積し、タンパク質合成能が低下し、さらに欠乏が進行するとプロレシニンなどの有害なアミン類も集積する³⁴⁾。

文 献

- 1) 田口亮平：植物生理学大要，養賢堂，60～61(1983)
- 2) 熊沢喜久雄：肥料科学，肥料科学研究所，1，40～47 (1978)
- 3) 舟木行雄ら：駒沢女子短期大学研究紀要，17，15～19 (1984)
- 4) 舟木行雄ら：駒沢女子短期大学研究紀要，18，15～19 (1985)
- 5) 舟木行雄ら：駒沢女子短期大学研究紀要，19，13～17 (1986)
- 6) 田口亮平，田崎忠良：実験植物生理生態学実習，養賢堂，64～66 (1983)
- 7) 渡辺篤二ら：食品分析法，日本食品工業学会，食品分析法編集委員会編，光琳，3～8 (1982)
- 8) 渡辺篤二ら：食品分析法，日本食品工業学会，食品分析法編集委員会編，光琳，239～246 (1982)
- 9) Kjeldahl, J. : Z. Anal. Chem., 22, 366 (1883)
- 10) 小原哲二郎ら：食品分析ハンドブック，建帛社，261～263 (1975)
- 11) 平野四蔵ら：無機応用比色分析，共立出版，3，108 (1973)
- 12) Gomori, G. : J. Lab. Clin. Med., 27, 955 (1942)
- 13) 田口亮平，田崎忠良：実験植物生理生態学実習，養賢堂，91～92 (1983)
- 14) Allen, M. B. and Arnon, D. I. : Physiol. Plant, 8, 653 (1955)
- 15) 有門博樹：日作紀，28，1 (1959)
- 16) Vlamis, J. and Davis, A. R. : Plant Physiol., 19, 33 (1944)
- 17) Hopkins, H. T. : Plant Physiol., 19, 33 (1944)
- 18) Larkum, A. W. D. : In Ecological Aspect of the Mineral Nutrition of Plant, ed. Rorison, 318 (1969)
- 19) 横山 正：修士論文，東京農工大学 (1979)
- 20) 葉田可林，天正 清，形山豊彦：土肥誌講要，24，61 (1978)
- 21) Skou, J. C. : Biochem. Biophys. Acta. 23, 394 (1957)
- 22) Hall, J. L. : J. Exp. Bot., 22, 800 (1971)
- 23) Brown, H. D. and Altschul, A. M. : Biochem. Biophys. Res. Commun., 15, 479 (1964)
- 24) Hodges, T. K. : In Encyclopedia of Plant Physiology, Transport in Plants II. Part A. Cells, ed. U. Lüttge and M. G. Pitman, New York, 261 (1976)
- 25) Fischer, J. D., Hansen, D. and Hodges, T. K. : Plant Physiol., 46, 812 (1970)
- 26) Weissman, G. S. : Plant Physiol., 39, 947 (1964)
- 27) Pate, J. S. : Soil Biol. Biochim. 5, 109 (1973)
- 28) Maizel, J. V., Benson, A. A. and Tolbert, N. E. : Plant Physiol., 31, 407 (1956)
- 29) 佐々木泰子，平田 熙：植物生理学，朝倉書店，5，147 (1981)
- 30) Nitsos, R. E. and Evans, H. J. : Plant Physiol., 44, 1260 (1969)
- 31) Miller, G. and Evans, H. J. : Plant Physiol., 32, 346 (1957)
- 32) Ben Zioni, A., Vaadia, Y. and Lips, S. H. : Physiol. Plant, 24, 288 (1971)
- 33) Mengel, K. and Simic, R. : Physiol. Plant, 28, 232 (1973)
- 34) 但野利秋：植物生理学，朝倉書店，5，173 (1981)