培養液処方の違いがレタスの葉面電位変化に及ぼす影響

中林和重・栗田真吏

明治大学農学部 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

Influence of Nutrient Concentration on the Electric Potential of Lettuce Leaves

Kazushige NAKABAYASHI and Masashi KURITA

*Department of Agricultural Chemistry, Faculty of Agriculture, Meiji University, 1-1-1
Higashimita, Tama, Kawasaki, 214-8571, Japan*

Abstract

Research has been conducted into the relationship between plant growth and changes in the electric potential of leaves. We previously investigated correlations between plant nutritional state and leaf potential, and in tomato plants, determined the specific frequencies at which nutritional changes alter the leaf electric potential. We demonstrated that nutritional diagnosis may be possible by measuring changes in leaf electric potential. The leaf potential of nitrogen-deficient tomato plants increased at 13 and 20 Hz, the potential of magnesium-deficient plants increased at 20, 13 and 5 Hz, and the potential of phosphorus-deficient plants increased at 30 and 20 Hz.

In the present report, we describe the relationship between nutritional state and leaf potential in lettuce. Peak electric potential in lettuce leaves occurred at 16-20 Hz. Peak electric potential increased in both nitrogen-deficient plants and plants grown in nutrient solution containing an excess of phosphorus. Lettuce growth was improved when N concentration in the fertilizer was increased and P concentration was decreased. Because growth is negatively correlated with leaf electric potential at 18 Hz, the nutritional state of lettuce may be evaluated by measuring leaf electric potential at 18 Hz.

Keywords : electric potential, leaf surface, nutritional condition, lettuce, hydroponic culture

緒 言

植物の生体電位に関する研究が進められており¹⁻⁵⁾, 温度や湿度などの植物の生育環境に関するもの⁶⁾の他, 作物の栄養状態と葉面電位変化の関係⁷⁻¹²⁾にも及んでいる。

たとえば, トマトを窒素貧栄養状態で育てると 14 Hz および 20 Hz の葉面電位が大きくなり, マグネシウム貧栄養状態では 20 Hz, 13 Hz および 5 Hz の葉面電位が大きくなること, さらにリン貧栄養状態では 30 Hz および 7 Hz の葉面電位が大きくなることが分かり¹³⁻¹⁵⁾,

葉面電位変化を利用した植物の栄養診断法の可能性が示された。

しかし, この葉面電位を用いた植物の栄養診断はトマトとミニトマトでしか行われておらず, 他の作物^{16,17)}に適用が可能であるのかは十分に検討されていない。また, いずれも貧栄養状態の診断のみを対象としており, 富栄養状態での研究もなされていない。そこで, 今回は養液栽培でレタスをさまざまな窒素およびリン栄養条件で栽培し, 植物体無機成分濃度と葉面電位の関係について検討した。

2002 年 8 月 2 日受付

2003 年 2 月 17 日受理

Table 1 Nutrition composition of each treatment

Treatment		Nutriton concentration (me/L)					
N concentration	P concentration	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	P	K	Ca	Mg
High	High	6	6	2	3	3	1
	Standard			1	3	3	1
	Low			0.5	3	3	1
Standard	High	3	3	2	3	3	1
	Standard			1	3	3	1
	Low			0.5	3	3	1
Low	High	1.5	1.5	2	3	3	1
	Standard			1	3	3	1
	Low			0.5	3	3	1

材料および方法

1) 栽培概要と試験区

栽培は明治大学生田校舎(神奈川県川崎市)内のガラス温室で行った。供試作物にはレタス(*Lactuca sativa* L. 品種‘キャスパ’：横浜植木株式会社)を用い、2001年4月13日に園試処方¹⁸⁾の0.2単位培養液を施用したバーミキュライト床に播種し、子葉展開後ウレタン製スポンジに仮植した。5月1日(播種後18日目)に約6Lの培養液を満たしたプラスチックトレイ(54×34×9 (cm))に発泡スチロール板を浮かべ、各試験区とも8株ずつ定植した。その後、5月9日(播種後26日目)に試験用の培養液に変更し、5月23日(播種後40日目)に収穫して、植物体の化学分析を行った。なお試験用の培養液には硝酸態窒素とアンモニア態窒素の割合が1:1であるレタス用培養液¹⁹⁾(EC=1.4~1.8)(Table 1)を用いた。

試験は実験計画法^{20~22)}に基づき、繰り返しのある二元配置による実験とした。すなわち、N濃度について、標準区の他、標準区に対してN濃度を2倍とした高濃度区、および標準濃度を半減させた低濃度区の3水準を設け、PについてもNと同様に標準区、高濃度区、低濃度区の3水準を設けて、これら二つの要因の組み合わせによる二元配置(9試験区)を2反復して計18試験区とした。

2) 生育調査

収穫したすべての株について地上部新鮮重を測定した後、それぞれの試験区で標準的な重量の2株について葉長、葉幅も測定して、無機成分分析に供した。なお、この2株のうち1株は通風乾燥(70°C, 24h)し、乾物重を測定した。

3) 植物体中無機成分分析

通風乾燥させた試料はそれぞれ湿式灰化し、分析に供した。全窒素は水蒸気蒸留法で、Pはバナドモリブデン法で、K, Ca および Mg は原子吸光光度計で測定した²³⁾。

4) 汁液中無機成分分析

通風乾燥させなかった1株は、地上部新鮮重の19倍の蒸留水を加えてミキサー(ナショナルファイバーミキサーMX-X42：松下電器産業株式会社)で1分間破碎し、均一になるようによく混ぜ合わせ、ろ液を分析試料とした。NO₃⁻-N はリフレクトクアント試験紙硝酸イオンテスト(Cat. No. 16971：関東化学株式会社)を用いて簡易比色計(RQ-Flex：MERCK社)で、Pは硫酸モリブデン法で、K, Ca および Mg は原子吸光光度計で測定した²³⁾。

5) 葉面電位の測定

測定は5月22日(播種後39日目)に、外部ノイズの少ない夜間(19:00~22:00)を選んで、モバイル型高速レコーダー(NR-2000：株式会社キーエンス)を用いて、サンプリング周波数を200 Hz、データポイント数を2000点に設定して行った。供試レタスは各試験区の中で代表的な1株を選定し、この1株から10個の葉面電位データを収集することを2回繰り返して計20個のデータを収集した。測定電極には脳波用皿電極(NE-115A：日本光電工業株式会社)を用い、PVA-Kペースト¹¹⁾(6%ポリビニルアルコール水溶液10mlと蒸留水6.5mlと20%四ホウ酸カリウム水溶液3.5mlを混合し、ゲル化させたもの)を電極に塗り、植物と電極との接着を良好にした。電極の装着位置は、導出電極の一方を測定する植物体の最大葉の葉脚近くに、他方を葉頂近くとした。

収集した時間軸データをWindows用パソコンソフト(DADiSP：アストロデザイン株式会社)を用いてFFT

Table 2 Growth and yield

Treatment		Fresh weight (g)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)
N concentration	P concentration			
High	High	81.6	18.8	20.8
	Standard	88.5	19.7	23.5
	Low	95.5	19.9	20.2
Standard	High	53.8	14.7	15.9
	Standard	58.1	16.2	15.4
	Low	65.8	17.3	17.9
Low	High	51.5	14.5	16.1
	Standard	70.8	17.2	18.3
	Low	66.3	15.7	18.0

Table 3 Analysis of variance (Effect of N concentration and P concentration on fresh weight of lettuce)

Source of Variation		Sum of squares	v	Mean square	F	P
A	N concentration	3061.38	2	1530.69	10.29	0.01
B	P concentration	601.89	2	300.95	2.02	0.17
Error	Within treatments	1933.09	13	148.70		
Total		5596.35	17			

Table 4 Inorganic component analysis of lettuce leaves

Treatment		Content (%DW)				
N concentration	P concentration	N	P	K	Ca	Mg
High	High	4.49	0.80	3.24	0.93	0.33
	Standard	4.10	0.71	3.40	0.92	0.29
	Low	4.27	0.63	3.78	0.59	0.30
Standard	High	2.78	0.57	4.76	0.73	0.38
	Standard	2.83	0.51	4.42	0.60	0.39
	Low	3.06	0.54	5.16	0.80	0.37
Low	High	1.91	0.48	4.06	0.79	0.26
	Standard	1.74	0.54	3.98	0.68	0.24
	Low	3.13	0.47	4.63	0.79	0.26

解析を行い、周波数軸スペクトラムに変換し、さらに移動平均を3回行いデータのスムージングを行って、葉面電位スペクトラムとした²⁴⁾。

結果および考察

1) 生育調査、植物体および汁液中無機成分分析

培養液中の N, P 濃度の違いにより地上部新鮮重, 葉長, 葉幅に差が見られた (Table 2)。N 濃度の違いについて見てみると, 高濃度区で最も地上部新鮮重が大きく, 標準区, 低濃度区と続き, 分散分析 (Table 3) によって

有意であることが示された (分散比 10.29 危険率 1.1%)。一方, P 濃度についてはその逆で低濃度区, 標準区, 高濃度区の順で地上部新鮮重が大きい傾向が見られた (Table 2)。また, 植物体中無機成分含有率 (Table 4) および汁液中無機成分濃度 (Table 5) は, N と P の両者ともに培養液濃度に対応して変動した。なお, 植物体中の N および P 含有率に関する分散分析表を Table 6 と Table 7 に, 汁液中の NO_3^- -N および P 濃度に関する分散分析表を Table 8 と Table 9 に示す。これらのことから, レタスは N 低濃度区で貧栄養となり, 植物体の N 養分欠乏症があらわれ, また P 高濃度区で富栄養

Table 5 Inorganic component analysis of lettuce sap

Treatment		Content (ppm)				
N concentration	P concentration	N	P	K	Ca	Mg
High	High	192	222	2682	620	151
	Standard	224	160	2379	416	142
	Low	271	141	2566	251	117
Standard	High	57	188	2452	316	166
	Standard	52	160	2157	287	117
	Low	63	151	2036	311	102
Low	High	25	199	2330	291	130
	Standard	20	172	2928	371	111
	Low	12	182	2964	322	128

Table 6 Analysys of variance (Effect of N concentration and P concentration on N of lettuce leaves)

Source of Variarion		Sum of squares	v	Mean square	F	P
A	N concentration	12.96	2	6.48	16.06	0.00
B	P concentration	1.14	2	0.57	1.42	0.28
Error	Within treatments	5.25	13	0.40		
Total		19.35	17			

Table 7 Analysys of variance (Effect of N concentration and P concentration on P of lettuce leaves)

Source of Variarion		Sum of squares	v	Mean square	F	P
A	N concentration	0.16	2	0.08	17.59	0.00
B	P concentration	0.02	2	0.01	1.95	0.18
Error	Within treatments	0.06	13	0.00		
Total		0.23	17			

Table 8 Analysys of variance (Effect of N concentration and P concentration on NO_3^- -N concentration of lettuce sap)

Source of Variarion		Sum of squares	v	Mean square	F	P
A	N concentration	1501.15	2	750.57	23.01	0.00
B	P concentration	18.95	2	9.48	0.29	0.75
Error	Within treatments	423.97	13	32.61		
Total		1944.07	17			

Table 9 Analysys of variance (Effect of N concentration and P concentration on P concentration of lettuce sap)

Source of Variarion		Sum of squares	v	Mean square	F	P
A	N concentration	9.47	2	4.73	1.20	0.33
B	P concentration	70.94	2	35.47	9.03	0.00
Error	Within treatments	51.09	13	3.93		
Total		131.49	17

Fig. 1(a) Spectrum of leaf electric potential in various N concentrations in the fertilizer(—; High N concentration, ---; Standard N concentration, ····; Low N concentration)

Fig. 1(b) Spectrum of leaf electric potential in various P concentrations in the fertilizer(—; High P concentration, ---; Standard P concentration, ····; Low P concentration)

Fig. 2 Relationship between electric potential at 18 Hz and concentration N or P (↑ : 95% confidence interval)

Table 10 Analysis of variance (Effect of N concentration and P concentration on leaf electric potential at 18 Hz)

	Source of Variation	Sum of squares	v	Mean square	F	P
A	N concentration	0.24	2	0.12	3.09	0.10
B	P concentration	0.21	2	0.11	2.73	0.12
AB	N concentration × P concentration	0.51	9	0.13	3.30	0.06
Error	Within treatments	0.35	9	0.04		
	Total	1.30	17			

養状態となり、植物体の P 養分過剰症があらわれて、それぞれ地上部新鮮重が小さくなったものと考えられる。なお、これらの症状は肉眼観察結果^{25,26)}によっても支持された。

2) 葉面電位スペクトラム

各試験区とも 18 Hz 付近 (16 Hz ~ 20 Hz) に最大ピークがみられ、そのピーク電圧は N については培養液中 N 濃度と負に、P については培養液 P 濃度と正の関係を示した (Fig. 1)。この範囲の周波数のうち、中央値である 18 Hz の電位に着目したところ、N および P 施用濃度と相関が見られた。すなわち、N については培養液の N 施用濃度が低く、汁液中 NO_3^- 濃度が低いほど貧栄養となって 18 Hz の葉面電位が大きくなる傾向が

みられた (分散比 3.1, 危険率 9.5%) (Fig. 2, Table 10)。逆に、P については施用濃度が高い場合に汁液中 P 濃度が高すぎとなり、18 Hz の葉面電位が大きくなる傾向がみられた (分散比 2.7, 危険率 12%)。特に、18 Hz 付近の葉面電位は、N 栄養に関りながら地上部新鮮重と逆相関の関係がある (Fig. 3) ことから、これは植物体中の栄養状態をも反映した生育不良のシグナルと考えられる。また、16 ~ 20 Hz 付近のピーク電圧値の大小や 18 Hz の電位の大小を植物の栄養状態や生育と関係付けるだけでなく、栄養状態によって電位のピーク発生周波数がシフトしていることも考えうることから、今後、これらの変化を詳細に検討して N と P それぞれの不足や過剰状態の電気信号を区別できるように研究を進めたい。

Fig. 3 Relation between 18 Hz electric potential and yield

謝 辞

本研究を実施するに当たり、栽培管理と化学分析等で協力していただいた浅井司氏、鈴木崇範氏、進藤智氏に深く御礼申し上げる。また、同日同時刻に行う多数のデータ収集に協力していただいた明治大学農学部2年7組(2001年度)の皆様に深く御礼申しあげる。

引用文献

- 1) 原田和夫：ナス葉面電位の光応答に及ぼす光照射強度およびアブシジン酸の影響，電気学会論文誌 E119(5)：270-278(1999)
- 2) 歌丸 剛，中村 真，長谷川 栄，佐野明子，田中大輔，平間淳司，宮本紀男：葉面電位信号を指標とした植物光生理特性探知の試み，日本植物工場学会平成12年度大会講演要旨集，pp. 48-49(2000)
- 3) 横地秀行，青木照護：植物の周期的光照射に対する葉面電位応答，日本植物工場学会平成12年度大会講演要旨集，pp. 164-165(2000)
- 4) Aimi, R. and Shibasaki, S. : Diurnal change in bioelectric potential of *Phaseolus* plant in relation to the leaf movement and light condition, *Plant and Cell Physiol*, 16 : 1157-1162(1975)
- 5) 内田 徹，中西美一，浦田真紀：栽培制御のための植物生体電位に関する研究(第1報)ハウレンソウの葉面電位計測，生物環境調節 28(3)：113-118(1990)
- 6) 大政謙次，近藤矩朗，井上頼直：植物の計測と診断，朝倉書店，pp. 86-90(1988)
- 7) Nakabayashi, K. and Matsumoto, K. : Diagnosis of nutritional disorders in plants based on the bioelectric spectrum, *Bull. Fac. Agr. Meiji Univ.*, 113 : 11-16(1997)
- 8) Nakabayashi, K., Matsumoto, K. and Nakayama, M. : Diagnosis of nutritional disorders in plants based on the Fourier transformation spectrum of bioelectric potential on a leaf surface, *Bull. Fac. Agr. Meiji Univ.*, 115 : 1-6(1998)
- 9) 中林和重，松本匡史：葉面電位変化を用いた植物の栄養診断，日本生物環境調節学会1998年大会合同大会講演要旨集，pp. 462-463(1998)
- 10) 松本匡史，田中剛毅，中林和重：葉面電位を用いたミニトマトの栄養診断，日本植物工場学会平成10年度大会学術講演要旨集，pp. 124-125(1998)
- 11) 中林和重，松本匡史：トマトの葉面電位の特徴と栄養診断への適用，植物工場学会誌 11(3)：189-200(1999)
- 12) 松本匡史，江澤智子，中林和重：種々の要素欠乏条件下でのミニトマトの葉面電位変化の特徴，日本植物工場学会平成11年度大会講演要旨集，pp. 532-533(1999)
- 13) 中林和重，田中剛毅，栗田真吏：葉面電位の特定周波数を用いたトマトの栄養診断，植物工場学会誌 12(2)：112-116(2000)
- 14) 中林和重，栗田真吏：トマトの葉面電位の特定周波数を用いた栄養診断，日本植物工場学会平成12年度大会講演要旨集，pp. 31-32(2000)
- 15) 中林和重，栗田真吏：貧栄養トマトの生育初期における葉面電位変化と汁液無機成分との関係，農業環境工学関連4学会2001年合同大会講演要旨，pp. 261(2001)
- 16) 中林和重，栗田真吏，船木正人，進藤 智：養液栽培サラダ菜への特定周波数刺激と培養液へのサンゴ砂添加が光合成活性と葉面電位変化におよぼす影響，農業環境工学関連4学会2001年合同大会講演要旨，pp. 247(2001)
- 17) 栗田真吏，浅井 司，中林和重，船木正人：養液栽培サラダ菜への光照射と培養液へのサンゴ砂添加が葉面電位変化と植物体中無機成分に及ぼす影響，農業環境工学関連4学会2001年合同大会講演要旨，pp. 248(2001)
- 18) 池田英男：培養液調整，社団法人日本施設園芸協会編：最新養液栽培の手引き，誠文堂新光社，pp. 140-156(1996)
- 19) 池田英男，大沢孝也：水耕培養液中の NO_3^- と NH_4^+ 濃度並びに比率がそ菜の生育，葉中N成分および培養液のpHに及ぼす影響，園芸学会雑誌 52(2)：159-166(1983)
- 20) 尾島善一：実験計画法，久米均編：JUSE-QCASによる品質管理，日科技連出版社，pp. 235-251(1990)
- 21) 石川 馨，石川高範：二元配置法による実験：分散分析法入門，日科技連出版社，pp. 78-109(1977)
- 22) 奥野忠一，芳賀敏郎：実験計画法，培風館 pp. 108-127(1999)
- 23) 土壤養分測定委員会編：土壤養分分析法，養賢堂，pp. 171-296(1981)
- 24) 赤池弘次，和田孝雄：生体のゆらぎとリズム，講談社，pp. 1-226(1997)
- 25) 清水 武：肉眼判断による要素障害の診断：原色要素障害診断事典，農山漁村文化協会，pp. 153(1990)

- 26) 高橋英一，吉野 実，前田正男：植物の養分欠乏
症・過剰症：原色作物の要素欠乏・過剰症，農山
漁村文化協会，pp. 221 (1990)