サツマイモの根における温度傾度による炭水化物 移動効果と塊根肥厚との数理的対応

西 内 光

(大阪府立大学農学部 農業気象環境学研究室)

Mathematical Correspondence Between the Thickness of Root Tuber and the Effect of the Translocation and Accumulation of Carbohydrates According to the Temperature Gradient in the Roots of Sweet potatoes.

H · NISHIUCHI

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture.)

緒 言

筆者は、さきに、サツマイモの塊根形式状況、あるいは、その他の植物の生態から、自然界において炭水化物あるいはその他の物質の日中相対的低温部分への堆積効果の存在を帰納した。また、サツマイモの根について、実験的に、日中体内温度分布上の冷部において、人為的に結薯肥厚さすことができることを実証した。さらに、この為には地上部における炭水化物濃度の増加にともなつて、根の部分的温度差（すなわち温度傾度）による炭水化物その他の物質の移動効果を推論した（西内 1949, '53, '55）。

本稿は、このサツマイモの根における部分的温度差による炭水化物移動効果の存在を詳論し、さらにさきに筆者が数理的にもとめた根中炭水化物堆積率の理論式（西内 1957）と照合して、サツマイモ塊根の結薯肥厚様相を説明するものである。

1. 植物体内炭水化物移動

植物の根の一局部の実質的肥厚には、当然その局部に物質の蓄積をともなつてゐる。それが何によつておこるかをかんがえてみる。大別して、次の2つの場合がある。

(1) その局部の先天性によつて、積極的に、物質を蓄積する場合。

(2) 後天的に、何等かの原因によつて、その局部へ物質が堆積する場合。之は環境条件あるいは人為等、他為的操作によつて、体内物質移動の停滞にもとづくとかんがえられる。

勿論、之等の肥厚が生物現象として発現するための条件として、酸素、体内あるいは体外の水分、温度、その他環境要素が、ある限度範囲にあることは必要であらう。

塊根等、貯蔵炭水化物は、地上部茎葉において光合成
1957年4月5日 昭和32年度大会にて発表の一部

によつて生成された炭水化物が、何等かの機構によつて地下部に移動してきて、根の遺伝的素因により、あるいは環境的に、塊根局部に停滞堆積し、蓄積された物である。

世上往々にして、先天性局部機能のみを重視して、単に遺伝的素因のみにより、あるいはその局部の好適環境条件のみによつて、自動的にその局部に肥厚等の現象がおこるかのごとくかんがえている人もあるが、その肥厚部分に炭水化物等、物質の充実がある場合、その物質がその局部で生成される物でなければ、単にその局部的環境条件のみならず、その物質が生成される組織から肥厚局部へ、その物質の移動機構の存在が必要である。

植物体内炭水化物の移動が、如何なる機構によつておこるかについて、充分なことは、いまだわかつていない現状ではあるが、関係があるとおもわれるのは次の事項である。

a. 植物体組織の局部的圧出力、あるいは局部的吸収力、すなわち生機力 之によつては、物質は吸収機能をもつ部分におおく、圧出力をもつ部分にはすくなくなる筈である。之等生機力は、温度、酸素、あるいは水分によつて影響されよう。

b. 重力 之による物質移動はもつぱら下降であるがかかる物質は上昇するかもしれない。また、この移動は体内水分によつて影響をうけるであらう。

c. 生体電位差による移動力 之は物質によつて、正荷電方向に移動する場合と、負荷電方向に移動する場合とがあらう。しかし、植物体内各部位の電位差およびその変化自体が未知であり、(a)とあわせて、生機力にふくめられる。之に影響するのは、酸素および温度、体内水分であらう。

d. 炭水化物その他の物質の濃度差による拡散力 之には、温度、体内水分の影響があるが、この場合、物質は均質的にひろがる。ゆえに、之によつては、

局部的堆積は阻止されることになる。

e. 植物体の部分的温度差による移動力 之は物理化学上、熱拡散（温度差拡散, thermal diffusion）の理象がしられているが、さらにまた、植物体内渗透系に部分的温度差が生じた場合をかんがえても、機構的に物質移動がおこりうることが成立する。その機構については別稿で論ずることとする。この場合も、体内水分は物質移動を円滑にするために必要であろう。

普通、根の伸長にさいしては、まず、ある程度の水分、温度、酸素の量的条件の下で、生機力（a）による発根がおこると、濃度差拡散（d）、および、あるいは生体電位差（c）による物質移動にともなつて伸長し、また重力（b）によつて向地的に下降する。

しかし、その伸長した根の中での物質の堆積あるいは蓄積、貯蔵は、もし生機力（a）によるものとする、吸収機能をもつ局部においてであり、もし重力（b）による場合をかんがえたと堆積は根の下端においてである。生体電位差による移動力（c）については、植物体内電位分布およびその変化自体が未知であり、ここで論及することはできない。濃度差拡散（d）は物質移動に重要な関係があるとはおもわれるが、そのみによつては局部的堆積はおこりえない理である。

根の一局部に体内水分がおおくなると、その部分の物質濃度が小になつて、その部分への拡散移動がおこることとはかんがえられるが、その結果は濃度は大になるのではない。筆者がサツマイモの根の一部分に水湿をおおくあたえた実験によつても、局部的水分供給部分では表皮から細根の分岐がみられたが、内部的蓄積肥厚はみられなかつた（西内 1953）。

いま、部分的温度差による拡散効果（e）が存在するものとかんがえたと、根の局部的低温部、あるいは根にそつての温度傾度の急変している部分、数学的にいえば根の温度の2次微分的傾度が極大値あるいは極小値となる部分に物質の停滞堆積がおこることになる。

事実上実験的に、サツマイモの根の一局部冷却によつて、その部分を肥厚結着させることができることは、すでに既報した通である（西内 1953）。

また、地中において、実際みられるサツマイモが結着肥厚している部位は、地中温度分布上、上記の温度傾度の条件を具備している部位に他ならないのである。之について、以下ですこしくわしくのべよう。

2. サツマイモ塊根の結着と温度傾度による炭水化物移動効果との関係

いま、実地栽培において、サツマイモの根についてみ

ると、莖茎からの発根はある程度の水分、温度および酸素の量的条件下で伸長し、向地的に下降するが、塊根化し結着肥厚している様相は、普通圃地では、土壌面から約 10cm の深さの部位を肥厚極大部として、地下 30cm 以下ではほとんど肥厚していない。梗根、俗にいう蛸足となつて地中ふかく伸入している場合はまれにあるが、之は結着ではない。

なお、高畦において、上部が梗根となり、いわゆる首長で結着している場合があるが、その場合も結着部位は土壌面から約 10cm の深さの部位を中心としている。

しかし、鉢植や箱植等においては、根の末端ちかくでも肥厚している場合もあり、またその着の形は一定していない。之については既報した処であるが、その他、筆者や他のおおくの研究者の種々の既報実験に徴しても、肥厚結着部分が先天的遺伝的に決定されているものではないことは明白である（伊東 1945, 伊東 1947, 戸邇 1949, 今村 1955 等）。

したがつて、サツマイモの塊根として結着肥厚している局部での炭水化物堆積は先天的遺伝的な局部的吸収蓄積機能によるものではない。重力の影響は下降的のみであり、濃度差拡散は堆積にはむしろ逆効果を呈するものである。生体電位差については不明であるが、それでもつて論ずるには、何故地下約 10cm 附近に限定される電位的特性を生ずるかは、かんがえられない。

地下約 10cm 附近の環境条件として、ある範囲程度の温度、酸素、水分の量的状態が一応かんがえられるがそれ等をもつては、土地、時期の如何にかかわらず、地下約 10cm 附近にのみあらわれる特性とはならない。ただ、地下約 10cm の深さの部位の局部的温度の量値のみならず、地中温度分布様相を考慮して、地下約 10cm の深さの部位の地中温度傾度の数値的特性をかんがえたと、そこに顕著な特性が指摘できる。そして、之とサツマイモ塊根の肥厚部位および結着様相との対応から部分的温度差による根中炭水化物移動効果の存在および影響ならびにその結果としての結着肥厚がおおいにかんがえられる。之について、次節でさらに説明しよう。

3. 地中温度傾度による理論的根中炭水化物堆積率とサツマイモ塊根肥厚様相との関連

筆者は、別稿において、1 植物体内溶液の移流について、部分的温度差によつて、すなわち温度傾度の存在によつて、炭水化物移動の項があるとして（前提 1）、また、根中溶液では炭水化物のモル分率および溶媒（炭水化物以外）のモル分率はそれぞれ一定値で平衡し、炭水化物のモル分率がその一定平衡値以上になると、余分は

非溶解化し組織化されるものとし（前提2），さらにまた，体内溶液濃度は地上部茎葉内の炭水化物濃度の日変化に準ずるものとして（前提3），根中溶液の炭水化物濃度と地中温度傾度による炭水化物移動効果から次のごとき，地中の深さによる数理的根中炭水化物堆積率の理論式をしめた（西内 1957）。

M_Z を深さ Z における1日間の根中炭水化物堆積率とすると，

$$M_Z = CaAp^2 e^{-pZ} \sin pZ \quad (3.1)$$

ここに， C は炭水化物および溶媒の平衡モル分率ならびに温度差拡散係数に関係してきまる常数で，ここでは比例常数となっており， A は地面温度変化振幅， a は溶液の炭水化物濃度日変化振幅， e は自然対数の底， p は深さによる地中温度日変化振幅の対数減小率である。

直根において，各深さにおける単位断面積あたり炭水化物堆積の大きさに比例して，肥厚し塊根化するものとする，深さ Z での断面直径 R_Z は M_Z の平方根に比例することになり，

$$R_Z = C' p \sqrt{e^{-pZ} \sin pZ}$$

となる。ここに， $C' = \sqrt{\alpha A a}$ で，比例常数である。

p は土壌の状態，とくに含水量によって変動するが，普通圃地土壌では 0.06 乃至 0.14/cm の値をとるもので， p の種々な値について，深さ Z にたいする根中炭水化物堆積率を計算し，縦軸に深さ Z 横軸に堆積率 M_Z あるいはその平方根をとって，図示すると 3.1 図のごとくなる。 $Z=0$ および $Z=\pi/p$ では堆積率は 0 で $Z=\pi/4p$ で極大値をとる。3.1 図のごとく， p の値の差にうじて堆積極大部位は深さ約 5cm 乃至 13cm の範囲で変動し，平均的には約 10cm の深さにあり，堆積末端部位は深さ約 20cm 乃至 50cm の間を変動する。 p の値が大であるほど，堆積極大部位の深さ $\pi/4p$ はあさくなる。埴土では，土壌の乾湿の変動大で， p の変動も大であり，堆積極大部位 $\pi/4p$ の変動もはげしいとおもわれる。砂土では，土壌は乾燥し，土壌水分の変動が比較的すくなく， p の値は大であり，その変動すくなく，堆積極大部位は比較的あさく一定しているであろう。しかし實際上，埴土と砂土，あるいは土壌の乾湿の

3.1 図 深さによる根中炭水化物堆積率曲線とサツマイモ肥厚との対応

差による p の値の変動の巾は案外すくなく，普通土壌では略 0.08/cm であり， $Z=\pi/4p$ の深さは略 10cm である。

サツマイモ塊根は，根中炭水化物の局部的堆積にうじて，その局部が肥厚した最顕著例とみなしうるものである。筆者は，別稿において3前提にもとづいて，地中

の深さによる根中炭水化物堆積率の式をもとめた。その3前提は模式的であり、また議論もあろうが、サツマイモについて、一応近似的に、その3前提が成立しうるものとして、その理論的根中炭水化物堆積率の曲線とサツマイモの根が土壤面にたいするのび方とを、3・1図のごとく対照してみると、両者の間の密接な関連がみとめられよう。

サツマイモ塊根の結着肥厚様相については、かつて、経験観察上、また実験上、幾多の実例を報告した(西内1949)。根が地面に垂直に伸入している場合には、塊根は地下約10cmの深さの部位を肥厚中心として、短円乃至短紡錘状となり、斜入している場合には、長紡錘状乃至楕円状となる。根があさく地面に平行してのびた場合、また人為的に伸根を土壤表面に平行してあさくうずめておいた場合には、諸形は棍棒状となる。その他、根の屈曲におうじて、諸形が変異していることがみとめられる。之等は3・1図右側の諸形のごとく、深さによる根中炭水化物堆積率の曲線と対照して理解されよう。

土壤表面が多湿温で、地中温度傾度がよわい場合には根はあさく斜入し、諸形は細長となる。強日照下、地中温度傾度がつよい場合には、土壤表面は乾燥していても土壤内部に水分がある程度あれば、根は直入し、諸形は短円乃至短紡錘状によく肥厚することになる。なお、局部土壤水分を主として根の表皮に作用して、細根の発生に影響し、主根端からの水分吸収によつて体内水分が充分ある限りは、塊根の肥厚をおこす根中形成層の発達には支障はない。之等は川岸砂地で良質の諸がえられる以外を説明しうるものである。

地中10cmよりふかい土壤中層以下では、酸素減少によつて根の伸長肥大が阻止されるといえるが、砂地においては、地下深部まで酸素量は大であるにもかかわらず、砂地の諸は短円あるいは短紡錘状となり、埴土の諸は角ばつた形となる傾向があることは、実際経験観察されることであり、実験的にもみとめられ、報告されている。

天候上からも、初期の地下伸根が順調で、後晴天がつづく、と、諸形は円滑であるが、晴雨の変動がおおきいと諸形は不整となる。

之等は、前述のごとく、埴土や天候不順の場合には、土壤の乾湿の変動つよく、したがつて p の変動大で、堆積極大部位の変動により、角ばつた形となる。砂土や晴天つづきの場合には、表土は乾燥したまま、土壤水分の変動が比較的すくなく、 p の値の変動小で、堆積極大部位が安定していて、日照による地上部莖葉での炭水化物生成およびつよい温度傾度による炭水化物移動効果と

あいまつて、諸形は円滑肥厚するものと解釈できる。

また、経験および実験上、土壤内の部分的温度差のすくない状態では、結着は不良で、細長梗根状となることも理解されよう。

土壤面が、中耕、培土、あるいはまた土壤侵蝕によつてかわると、根の深さの地面にたいする相対位置が変化し、諸形にも影響する理である。

高畦栽培や塚植においては、土壤温度分布が平畦の地中温度分布とやや様相がちがうとともに、土壤面にたいする根のび方および相対位置が複雑となり、諸形の奇形を生じやすい訳である。

鉢植や箱植の場合は、土壤表面のみならず、側面からも熱の授受があり、その土壤温度分布は立体的で複雑であり、相対的低温部位も雑多におこり、根ののび方もまた複雑であり、垂直根について正常な地中温度分布にもずいて誘導した上記の地中の深さによる根中炭水化物堆積率の式では律することはできなく、塊根生成様相も複雑多である。

なお、前に緒言でものべたごとく、筆者は、かつて、ガラス管中にサツマイモの伸根をととして、その一局部を冷却することによつて、その冷却部分を結着せしめた。他に、サツマイモ畑の地中各種の深さに電熱温床線を埋設して、その部位の地温をたかめて、高地温部では結着肥厚しないことを実験報告した(西内・宮川1951)。

一般に、地温がたかいと、地上部対地下部重比(T/R 比)がたかくなることは、サツマイモのみならず、幾多の植物についての実験結果の報告(たとえばSHAW1952)にもみられる。之は、高地温によつて、根が肥料物質や水分の吸収の良好なことで、高地温中の根の呼吸促進のために物質消耗の結果であるとの2方面から解釈されていることがおおいが、その解釈法は二律背反の嫌いがあり、根部の物質吸収の佳良が、ただちにその吸収された物質の地上部への移動をとまうとはかぎらない。

過低地温における地上部の生育不良、過高地温における根の生育不良、ひいては地上部の生育不良は別としてある程度の温度範囲内では、むしろ高地温の場合は地下部と地上部との相対的温度差のために、温度傾度による植物体内炭水化物移動効果によつて、地上部から地下部への炭水化物移動が影響されて、地上部莖葉に物質停滞がおおくなり、地下部の根へ炭水化物移行がすくなくなつた結果であると解釈できる。

要 約

サツマイモの根において、部分的温度差による根中炭水化物移動効果存在の所以を論じ、理論的地中温度分布その他にもとずいて、理論的に、かつ数理的にえられた

地中の深さ Z における根中炭水化物堆積率の式

$$M_Z = CAap^2e^{-pZ}\sin pZ$$

によつて、サツマイモ塊根の肥厚様相を説明できる。

引用文献

- 今村(駿) 1955. 園芸学研究集録 7: 114—.
伊東(秀)・他 1945. 農及園, 20: 49—, '46, 農及園, 21: 13—, 149—, 199—, 255—.

伊藤(潔) 1947, 園芸学雑誌 16: 33—, 192—.

西内(光) 1949. 温度系効果, '53. Bull. Naniwa Univ. Series B. 3: 115—. '55, 大阪府立大学農業気象環境学研究室報告(仮刷) '57. 農業気象
西内(光)・宮川(逸) 1951 農業気象 6: 55—.

Shaw, B.T. 1952. Soil physical conditions and plant growth. N.Y.,

Résumé

The theory that there is the effect of the translocation and accumulation of carbohydrates according to the temperature gradient in the root of sweet potatoes was discussed.

The aspects of the formation and thickness of the root tubers of sweet potatoes can be explained in accordance with the following mathematical formula on the rate of carbohydrates accumulation M_Z in the root at the depth Z under the ground surface, that was obtained formerly in conformity to the theoretical distribution of the underground temperature and some suppositions,

$$M_Z = CAap^2e^{-pZ}\sin(pZ),$$

where C =a proportional constant, A =the diurnal amplitude of the temperature at the ground surface, a =the diurnal amplitude of the carbohydrates concentration of the solution in the root, p =the logarithmic lapse rate of the diurnal amplitude of the underground temperature by depth and e =the base of natural logarithms.

抄 録

海と浅い貯水池内の水平乱流拡散の実験的研究

Experimental Investigation of the Horizontal Turbulent Diffusion in the Sea and the Shallow Pond. Bull. Acad. Sci. U.S.S.R. Geophys series No. 6. 756~764. 1957.

R. V. Ozmidov

海洋乱流場内の拡散現象に $4/3$ 乗則を確実に適用するための基礎的な資料をうるために著者は海と貯水池 ($30 \times 18 \times 0.6$ m) で水平拡散の実験的研究をなしている。

拡散される物として Richardson と同様に紙片 (36×55 mm) が用いられた。紙片の動きは貯水池では 3 m, 海では 8.5 m の高さから 10 sec おきに、紙片が視野から外れるまで撮影された。これから紙片の運動が記録された。そして 2 つの紙片の最初の距離 l_0 と次の瞬間の l_1 との差 Δl が l_0 より幾分か小なる条件では、拡散係数は l_0 に固定されるゆえに拡散の方程式は普通の形式となり、その解は

$$q(l_1) = \frac{\text{const}}{\sqrt{T}} \exp \left[-\frac{(l_1 - l_0)^2}{4TF(l_0)} \right]$$

となる。そこで $l_1 - l_0$ の標準偏差は $\sqrt{2TF(l_0)}$ に等しいとおけるので、拡散係数は次式で与えられる。

$$F(l_0) = \frac{(l_1 - l_0)^2}{2T} = \frac{\Delta l^2}{2T}$$

この式に所要の値を代入して $F(l_0)$ が計算され、 $F(l_0)$ は $(l_{n+1} + l_n)/2$ のグループに分類され、平均された。そして平均 $F(l)$ は l に対してプロットされた。

4 m/sec に近い風が吹く条件下で、14, 35, 45, 57 cm の各水深で貯水池内実験が実施された。その資料から水深(H) なる比が 0.006 より小なる場合のみ池の大きさ(l) なる比が 0.006 より小なる場合のみに $4/3$ 乗則が満足されることがわかった。 H/l が大きになると $4/3$ より小なる指数となることが明らかとなった。これは予期されない結果であつたが定性的には説明されたと著者はのべている。そして $4/3$ 乗則からの外れの修正をなすために拡散係数を次の

$$F(l) = k \cdot l^{4/3} \cdot f(l/H)$$

ようにおいて、修正函数 $f(l/H)$ を測定値から決定している。拡散への異つたスケールの乱渦の寄与を知るために、 36×55 , 72×101 , 144×202 mm の 3 種の紙片を用いて、紙片より小さな乱渦の寄与を切つた実験を貯水池内で行つた。その結果から乱渦スペクトルのカットが大きくなるにつれて $F(l)$ は急激に減少することがわかった。紙片の動きを平均流の方向 (y) と直角方向 (x) に分けて $F(y)$, $F(x)$ を計算すると、 $F(y) \approx 8.4 F(x)$ となり、平均流の方向に $F(l)$ が大なる非等方性乱れが存在することがわかった。

貯水池内での紙片の動きの記録を利用して、 u' , w' のラグランジュ相関係数が求められた。 $Ru'(t)$ と $Rw'(t)$ の形は非常によく一致し、30 秒までは正の値であるが、あとは負の値を示した。いま平均流速を 10 cm/sec と考えると、これは 3 m の大きさの最大乱渦を意味する。

(内島善兵衛)