

甘藷の塊根肥大と地温との関係に関する一考察

植木健至・佐々木修

(作物学研究室)

昭和61年8月9日 受理

A Study of the Effect of Soil Temperature on Thickening of Tuberous Root of Sweet Potato

Kenji UEKI and Osamu SASAKI

(Laboratory of Crop Science)

緒 言

甘藷塊根の肥大に対して地温の影響は大きく、肥大の適温はおおむね20℃以上30℃以下の温度範囲にあり、この範囲外の地温のもとでは塊根の肥大は著しく抑制されるといわれている^{1,3,7,8)}。しかるに従来の諸知見によると、地温の高低が根の内部組織にどのような形態変化をひきおこしているかという基本的な検討が充分なされていない。そこで本実験において第1には塊根の肥大の初期段階に対する地温の影響を、主として内部組織の側面に着目して検討を加えたものである。なお、本実験は根域の限られたポットを水槽に設置して栽培するという特殊環境のもとで行われたものであるため、まず、植物体全体の生育特性について予備的な分析(実験Ⅰ)を行った上で、根の内部組織に対する地温の影響(実験Ⅱ)について検討を行った。第2には前述の得られた結論に若干の生理的考察の糸口を得るために、組織の熱伝導を測定したものである。

材 料 と 方 法

実験材料として甘藷品種ミナミユタカを用いた。直径10cm、深さ25cmのステンレス製ポットに展開葉7葉を有する苗の基部側2節までを土中に植え付けた。各ポット300mlの灌水を行った後、活着するまで自然条件下で生育させた。さらに、全生育期間中、ポット表面が乾燥しないよう適宜灌水を行った。肥料は基肥として1ポット当たり、硫酸アンモニウム0.8g、過リン酸石灰0.8g、塩化カリ0.6gを全層に施用し、追肥は行わなかった。ポット内土壌の地温は以下の方法によって変化させた。すなわち、3つの水槽(縦140cm、横30cm、高さ30cm)をガラス室内に設置し、電気低温恒温器および電気定温器を組み合わせ、各水槽の水温

本研究の一部は、文部省科学研究費(課題番号5856017)の補助を受けた。

をそれぞれ低地温(15℃)、中地温(25℃)、高地温(35℃)に保ち、これにポットを搬入することにより地温を変化させた。予備的に各水槽間でポットの入れ換えを行って地温の経時的变化を見たところ、ポット中心部の地温はおおむね2時間で水槽の温度と等しくなった。実験Ⅰは1984年に行い、1処理区当たり7ポットとし、処理期間は7月12日～8月20日(39日間)であった。試験区の構成はTable 1に示すとおりである。なお、

Table 1. Treatment of soil temperature at day and night

Night (5:30pm-8:30am)	Day (8:30am-5:30pm)		
	15℃ (L)	25℃ (M)	35℃ (H)
15℃ (L)	LL	ML	HL
25℃ (M)	LM	MM	HM
35℃ (H)	LH	MH	HH

ポットの入れ換えは8時30分と17時30分に定期的に行った。実験Ⅱは1985年に、1処理区当たり3ポットとし、6月1日～7月30日(60日間)にかけて行った。試験区の構成は第1実験と同様の処理区(ただし、夜間地温が昼間地温より高い区は除いた)のほかに、生育後半の20日間を昼夜25℃の定温状態とする区を加え、これらをそれぞれLL-M区、ML-M区、HL-M区、HM-M区およびHH-M区とした。根の組織形態の観察に当たっては、細根(直径5mm未満)と塊根(直径5mm以上)について中央部分を切り取り、通常のパラフィン法により厚さ14μmの横断切片を作成し、サフラニンとアニリンブルーの二重染色を行い光学顕微鏡で観察した。

熱伝導率の測定については次の通りである。測定用試料容器は厚さ1mmのアルミ板の上に、厚さ5mmの亚克力板で縦30mm、横20mmで囲み、高さは5mmとした。また亚克力板を接着したアルミ板側を下方にして放

熱側とした。一方、吸熱、放熱両方のアルミ板上に熱流検出用センサを接着した。吸熱側ではさらにその上に加熱用ヒータ（3ワット）を置いて試料容器のふたと兼用した。なお、熱流計は昭和電工製 HFM 熱流計 MR 型を、センサは小形面取り付け用の EM 型を特別に改造したものを用いた⁶⁾。

結果と考察

1. 甘藷の生育および塊根の肥大におよぼす地温の影響

(1) 実験 I

まず、茎葉部の生育に対する地温の影響についてみると低地温では著しく生育が抑制され、高地温になるにつれて生育は旺盛になる傾向が認められた (Fig. 1)。ただし、昼夜ともに25℃の地温のもとで

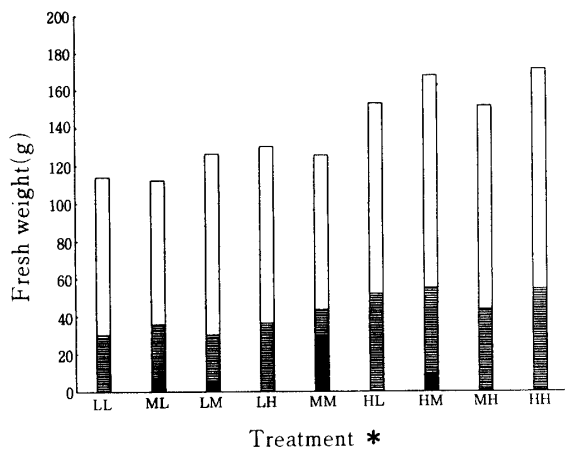


Fig. 1. Fresh weight of shoots and roots per plant grown under different soil temperature (Experiment I).

□ : Shoot, □ : Non-tuberous root,
■ : Tuberous root.

* LL, ML, LM, LH, MM, HL, HM, MH, HH : Each plant was grown for 39 days.

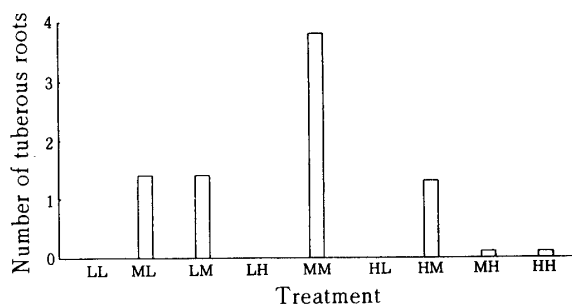


Fig. 2. The number of tuberous roots per plant grown under different soil temperature (Experiment I).

はむしろ低い値を示したが、このことは光合成産物の転流が根部（とくに塊根部）に優先的に行われた結果であると考えられる。また、昼夜の地温を逆転した処理区の間にはほとんど差は認められなかった。

一方、根部と地温の関係は茎葉部のそれとかなり異なった傾向を示した (Figs. 1, 2)。根重全体（細根および塊根）は地温の上昇に伴って若干増大する傾向にあったが、それ以上に塊根の肥大の様相に特徴的に地温の影響が認められた。すなわち、塊根数、塊根重については昼夜とも25℃区がもっとも勝り、15℃区および35℃区を組み合わせた区においては塊根の肥大はほとんどおこらなかった。このことに加えて15℃区または35℃区と25℃区を組み合わせた処理区においては、

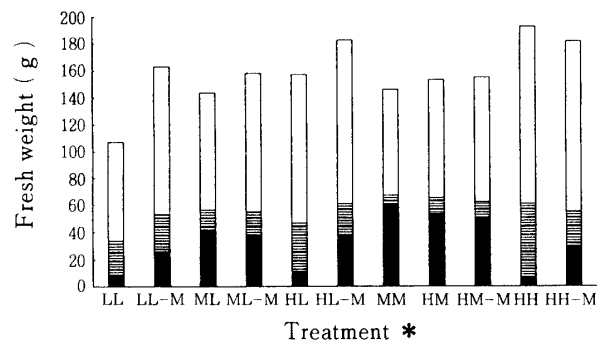


Fig. 3. Fresh weight of shoots and roots per plant grown under different soil temperature (Experiment II).

□ : Shoot, □ : Non-tuberous root,
■ : Tuberous root

* LL, ML, HL, MM, HM, HH : Each plant was grown for 60 days.
LL-M, ML-M, HL-M, HM-M, HH-M : Each plant was grown for 40 days as in experiment I, then, transferred to intermediate soil temperature (M) for 20 days.

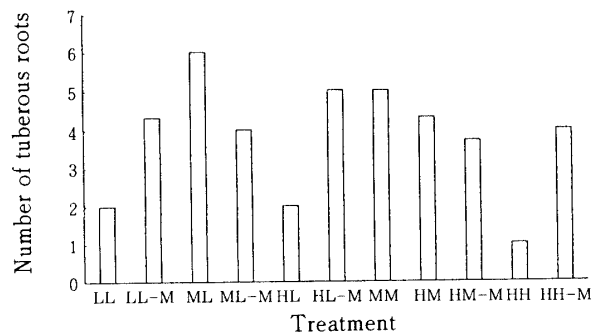


Fig. 4. The number of tuberous roots per plant grown under different soil temperature (Experiment II).

MM 区には劣るが、塊根の肥大が認められたことから本実験においては25℃前後が塊根肥大にもっとも適した地温と考えられ、15℃および35℃の地温は著しい抑制作用を及ぼすことが示された。ただし、MH 区については肥大がほとんど認められなかったが、これは光合成産物の地下部への移行が、夜間高温により妨げられたこと³⁾によるものと推察される。

以上の実験結果より、塊根の肥大には地温が著しい影響を及ぼしており、低地温においては植物全体の生育と共に塊根の肥大を抑制し、これに対して高地温においては地上部の生育は旺盛となるが塊根の肥大に抑制的に働き、いわゆる“つるぼけ”的な生育を示すことがわかった。なおこれらの実験結果は従来の報告¹⁻³⁾と大きく異なるところはなかった。

(2) 実験Ⅱ

全生育期間にわたって処理を一定にした区について

みると、1984年の結果とおおむね同様の結果を示した (Figs. 3, 4)。とくに塊根の肥大については15℃および35℃の地温を組み合わせた処理区においては若干の肥大は認められたものの塊根数、塊根重とも他の区に比べて著しく劣っていた。ただし、前年と比較して、MM 区に対し、各処理区の塊根数および塊根重が相対的に高い値となっているが、これは、ポット栽培による限られた根域の中ではたとえ適地温であっても肥大に限界があり、60日間という長期の生育期間に各処理区の間差が小さくなったものと考えられる。次にこれらの処理区と、生育後半に25℃定地温に移した処理区とを比較してみると、とくに15℃および35℃の地温を組み合わせた区においては、生育後半に25℃定地温に移すことによって塊根数、塊根重に著しい増加が認められた。この場合塊根重の著しい増加は、移す時点ですでに塊根となっていたものの肥大の促進による

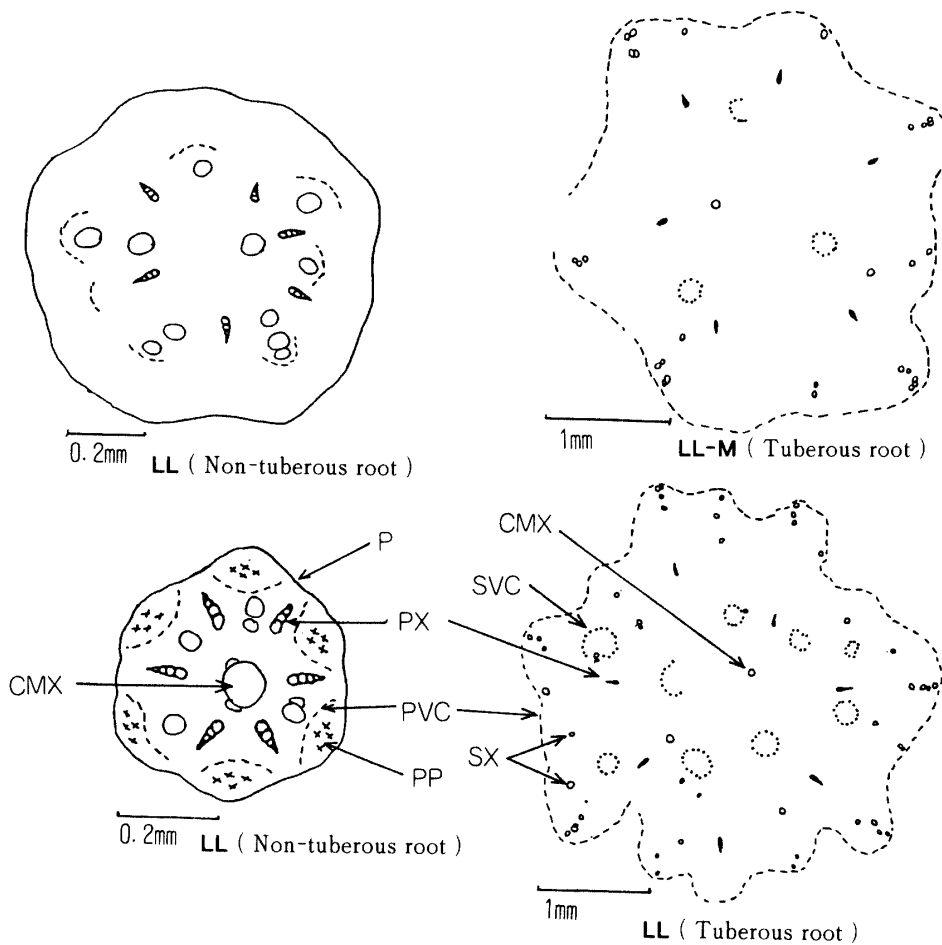


Fig. 5. Tissue structure at transverse section of the roots grown under LL and LL-M, soil temperature.

P : Pericycle, PX : Protoxylem, PP : Protophloem, CMX : Central metaxylem, SX : Secondary xylem, PVC : Primary vascular cambium, SVC : Secondary vascular cambium.

ものもあるが、それとともに肥大が抑制された状態にあった細根が塊根化したことによるものと考えられる。

そこで次に15℃と35℃の地温を組み合わせた処理区と、これらを生育後半に25℃定地温に移した処理区、および25℃定地温区に着目して根の内部組織がいかなる影響を受けるかという点についてとくに組織の木化と形成層の2点について検討を行った。

(a) LL 区および LL-M 区 (Fig. 5)

細根の木化はほとんど起こらず、いわば若根の様相を呈しており⁸⁾、第1次形成層については、原生篩部の中心側に部分的に形成層が分化するものの原生木部と内鞘との間に形成層の分化がおこる前段階で停止した状態にある。一方、塊根まで肥大したものは原生木部列が塊根の周縁部分に環状に配置していることから、根の中心部の柔組織の活動が活発で、ここに第2次形成層が分化し、主としてその活動により塊根化が進んだものであろう。また、第1次形成層は著しいしゅう曲を示していたが、これはとくに原生篩部近接部分における第1次形成層の活動程度が非常に低いためおこ

るものと考えられる。25℃定地温に移した場合に塊根数が増加するのは比較的直径の大きい状態に留まっていた細根が上述したような活動を回復し、塊根化したことによるものと考えられる。

(b) HH 区および HH-M 区 (Fig. 6)

細根の第1次形成層は、LL 区と同様であり活動は停止した状態であるが、木化の著しい進行が特徴的に認められる。塊根となったものについてみると、第1次形成層由来の細胞列が放射方向に規則正しく配列していること、導管周囲の柔組織の木化がすみやかに進行するため第2次形成層の分化が起こらないこと、原生木部列の環が中心に集中していることより、HH 区の塊根は第1次形成層の活動のみで肥大したものであることがわかる。なお塊根の第1次形成層が不連続であるのは未分化であるのではなくむしろ活動低下による消失であろう。25℃定地温に移した場合塊根数が増加するのは、塊根の中央域に、原生木部列および多数の木化細胞群が認められることからみて、直径の大きい状態にとどまっていた細根の第1次形成層の活動が

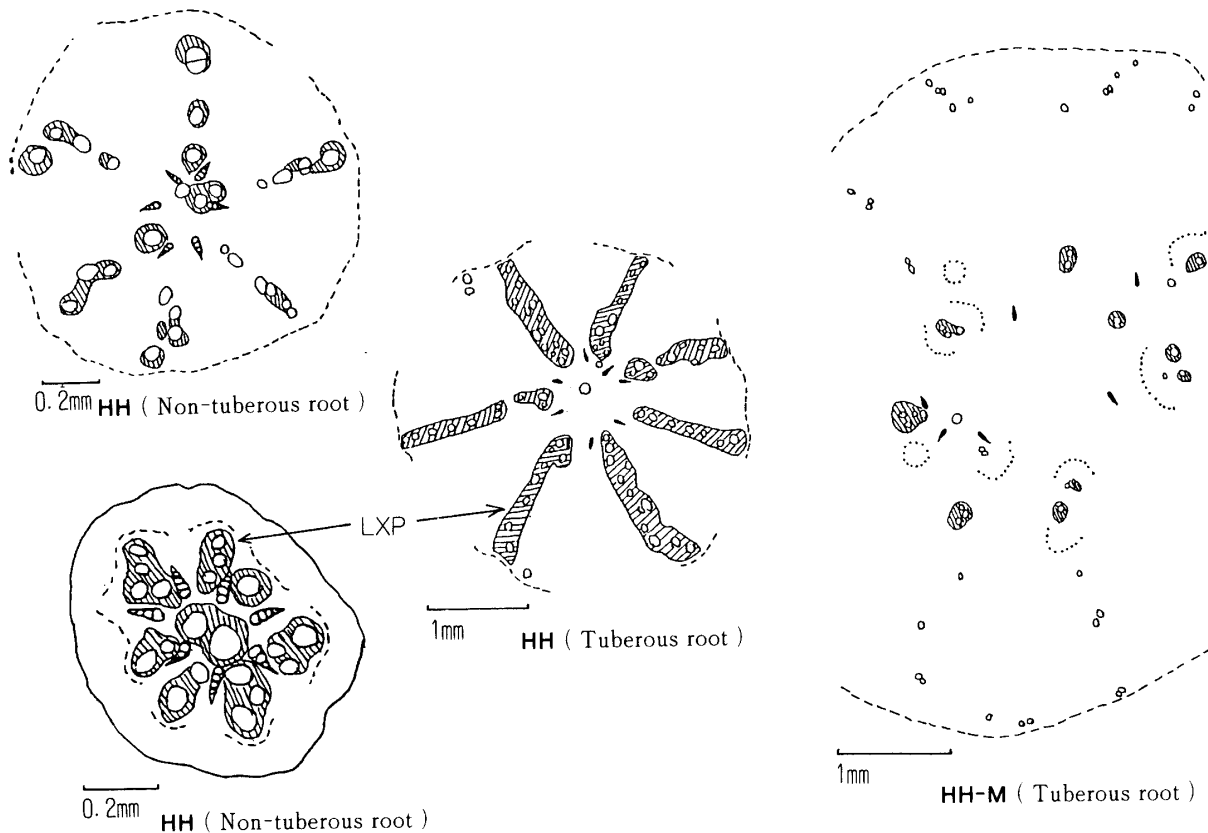


Fig. 6. Tissue structure at transverse section of the roots grown under HH and HH-M, soil temperature.
LXP : Lignified xylem parenchyma.

まず活発化し、つづいて、原生木部列の周辺部に第2次形成層が分化し肥大が行われたものと考えられる。

(c) HL 区および HL-M 区 (Fig. 7)

細根の第1次形成層は LL 区と同様である。木化はかなり進行しているものの、その程度は HH 区ほどではなかった。このことは木化の進行が35℃という高地温に強く支配されていることを示すものである。一方塊根となったものについてみると肥大はやはり HH 区のそれと同様に第1次形成層の活動に依存して進行している。しかし、周辺部の木化は HH 区ほど急激には進行せず、第2次形成層が若干分化することにより、塊根肥大の一翼を担っていると考えられる。25℃定地温に移した場合に塊根数が増加するのは、HH 区と同様、やはり直径の大きい状態にとどまっていた細根の第1次形成層の活動が活発化し、つづいて原生木部列の周辺部に第2次形成層が分化し、肥大が行われたものと考えられる。

(d) MM 区 (Fig. 8)

細根の第1次形成層は LL 区と同様である。木化の程度は HL 区よりやや少ない傾向にあった。塊根となったものについてみると第1次形成層の層も厚く非常に活発であることが考えられ、第2次形成層の分布域も広いことから、両者の活動が協同的に行われることによってすみやかな肥大が起こることが推察された。

地温が甘藷根の内部組織の形態におよぼす影響は以上の通りであった。一般に塊根となる根では、まず原生篩部の中心側に形成層が分化した後、続いて原生木部と内鞘との間に形成層が分化し、両者が接続して環状の第1次形成層となる。この第1次形成層の活動によって形成された第2次木部柔組織に、順次、第2次形成層が分化し、以後この2つの形成層の活動によって塊根の肥大は進行するものとされている^{4,8)}。本実験の結果、低地温および高地温は塊根の肥大を著しく抑制するが、その場合、内部組織に対する作用は異なっていることが明らかとなった。すなわち低地温では木

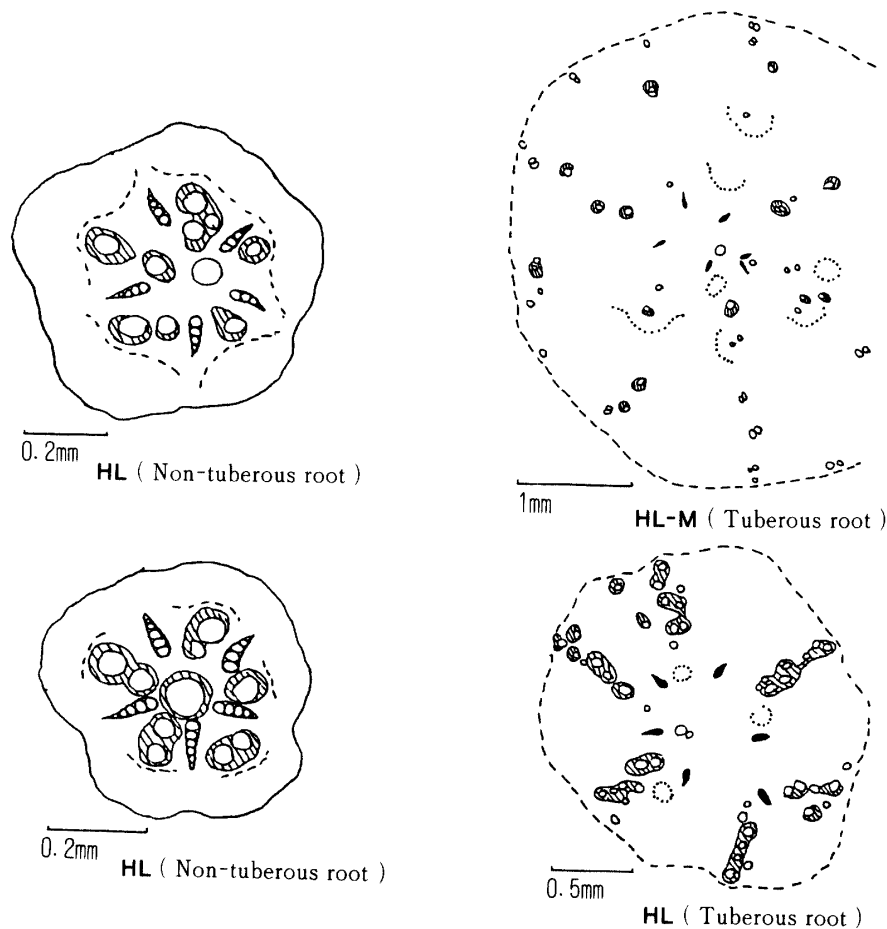


Fig. 7. Tissue structure at transverse section of the roots grown under HL and HL-M, soil temperature.

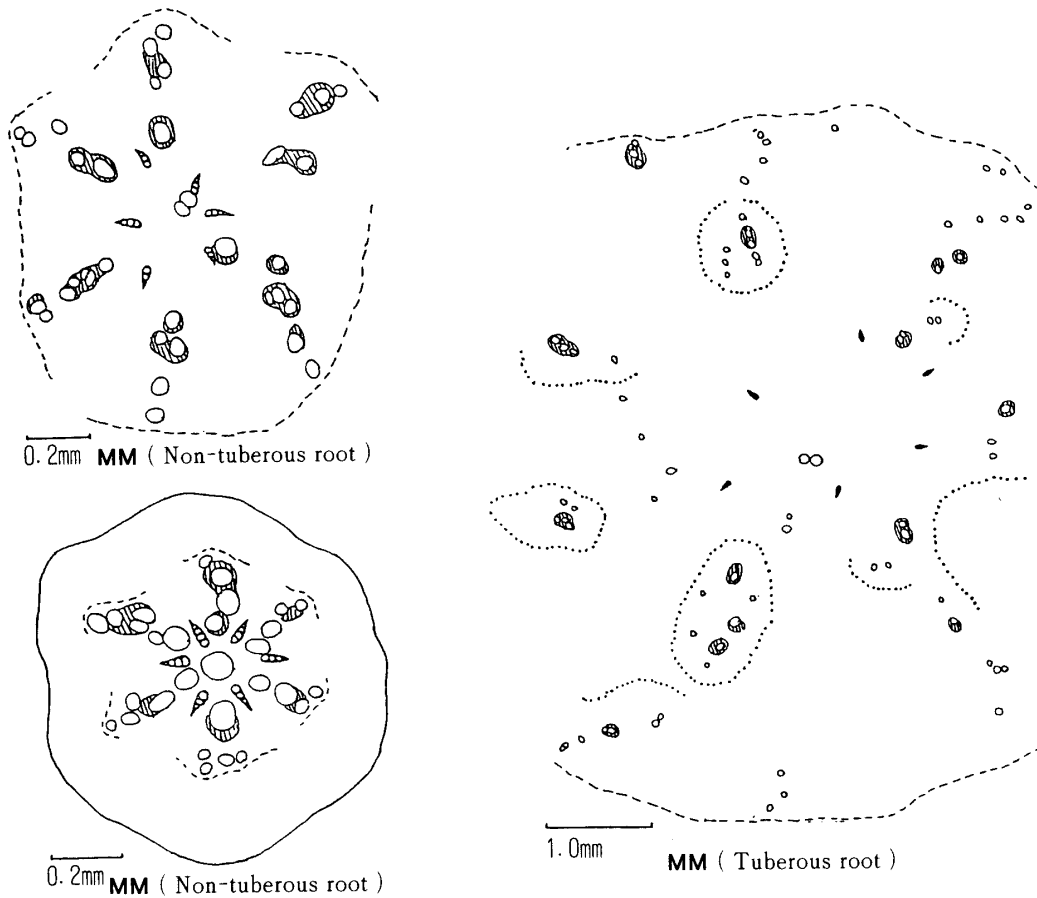


Fig. 8. Tissue structure at transverse section of the roots grown under MM, soil temperature.

化は進行しないが、第1次形成層の形成および活動が著しく抑制されることによって塊根化が起りにくくなるということであり、高地温は第1次形成層の形成および活動をそれほど抑制しないものの、木化の進行が著しいために第2次木部内に第2次形成層が形成されえないことによって塊根化が起りにくくなるということが推察された。また、低地温および高地温によって細根にとどまっていた根は中地温に移すことによって肥大し塊根となるが、根の前歴が異なると肥大の様相もまた異なっていた。すなわち前者においては根の中央近傍の柔組織の再活性化が、後者においては第1次形成層の再活性化がまずおこり、その後第2次形成層の形成および活性が伴っていくという方向をたどるものと考えられたのである。

2. 塊根組織における熱伝導について

塊根形成のみられた処理区について、塊根組織(厚さ5mm)の熱伝導を室温下で測定した(Table 2)。これを吸熱側と放熱側の平均熱流量で見ると、塊根肥大

の比較的良好なMM区、HL-M区、HH-M区で多く、反面、LL-M区、ML-M区で少ないことがわかる。前述のように最も肥大の良好であったMM区はいうまでもないが、生育前半で高温により中心柱に若干の木化の進行がみられても、その後25℃定地温に移すことにより形成層の発達が発達で肥大が順調におこなわれる場合には熱伝導率も比較的高くなっている。これに反して生育前半に低温処理した区はその後25℃定地温に移しても形成層の発達ひいては塊根の肥大が抑制され、熱伝導もまた低いことが明らかとなった。本実験は人工的環境のために供試個体数も充分に得られず、したがって結論的なことは差し控えるが、甘藷にとって生育初期の低温の悪影響の一面を暗示するものといえよう。熱流量の大小に関する生理的意義については今後の研究にまつとしても、その一端をうかがわせるものに組織の水分含量が考えられる。このような観点から2, 3の高, 低澱粉品種を用い、塊根組織の水分含量と熱伝導率との関係のみた(Table 3)。表でも明

Table 2. Thermal flux of tuberous root tissues (5mm in thickness)

Treatment	Thermal flux		Temperature		Difference of temperature (°C)	Q_1	Q_2	Mean thermal flux
	Q_1 (Kcal/m · h)	Q_2	T_1 (°C)	T_2		$T_1 - T_2$	$T_1 - T_2$	
MM	72.5	23.5	33	29	4	18.1	5.9	12.0
〃	70.9	24.9	33	29	4	17.7	6.2	12.0
HL-M	65.3	26.9	34	30	4	16.3	6.7	11.5
〃	81.7	28.9	33	28	5	16.3	5.8	11.1
HM-M	72.6	23.8	34	29	5	14.5	4.8	9.7
〃	72.5	23.5	34	29	5	14.5	4.7	9.6
HH-M	66.5	24.8	37	32	5	13.3	5.0	9.2
〃	61.5	27.1	36	31	5	12.3	5.4	8.9
HM-M	65.5	27.5	34	29	5	13.1	5.5	9.3
ML-M	62.2	21.5	33	28	5	12.4	4.3	8.4
LL-M	63.5	21.0	36	31	5	12.7	4.2	8.5

* Q_1, T_1 : Absorption side, Q_2, T_2 : Release side.

Table 3. Relation between thermal flux and water content in tuberous root tissues (5mm in thickness)

	Variety	Thermal flux		Temperature		Difference of temperature (°C)	Q_1	Q_2	Mean thermal flux	Water content (%)
		Q_1 (Kcal/m · h)	Q_2	T_1 (°C)	T_2		$T_1 - T_2$	$T_1 - T_2$		
Low starch content type	Okinawa No. 100	70.6	19.6	23	19	4	17.7	4.9	11.3	73.5
	〃	92.0	22.0	25	20	5	18.4	4.4	11.4	72.4
	Oiran	74.3	20.6	25	21	4	18.6	5.1	11.8	73.4
	Shirosengan	82.4	19.2	25	20	5	16.4	4.5	10.5	73.0
	〃	89.1	23.1	26	21	5	19.2	4.6	11.9	73.3
High starch content type	Tsurunashigenji	73.0	21.3	24	19	5	14.6	4.3	9.5	64.5
	〃	82.8	21.7	24	19	5	16.5	4.4	10.5	68.4
	Kyūshū No. 91	75.0	20.4	27	22	5	15.0	4.1	9.5	65.5
	〃	81.1	20.0	26	21	5	16.2	4.0	10.1	65.6
	Nōrin No. 2	82.9	21.3	26	21	5	16.5	4.3	10.4	66.1

* Q_1, T_1 : Absorption side, Q_2, T_2 : Release side.

らかなように水分含量の多い低澱粉品種は熱伝導率もまた高澱粉(低水分)品種よりも高い。このことから熱伝導の大小には多少なりとも水分含量の大小が影響することが推定されるのである。

過去に植物組織の熱伝導について、木材に若干の報告例⁵⁾がみられる。この場合、心材と辺材との熱伝導率の差異については木材組織の密度という表現で関連づけている。甘藷塊根組織の場合においてもこのような概念の導入が必要と思われるが、本実験においてその端緒となる水分に差異をみたことは興味もたれる。塊根の肥大は地上部よりの糖の転流が主因となるにせよ、肥大初期においては、適切な地下部温度環境によって組織密度を低く、水分含量を高く保持することがその後の生育を大きく支配するものと考えられるのである。

要 約

1. 低(15°C)、中(25°C)、高(35°C)地温の昼夜組み合わせ区を設け、移植後39日間および60日間の生育と塊根肥大におよぼす地温の影響をみた。

2. 地上部の生育は高地温ほど旺盛であった。一方、塊根の肥大は中地温区が最大で中、低地温または中、高地温の組み合わせ区がこれにつき、低、高地温のみ、またはその組み合わせ区において最低となった。

3. 組織学的にみた場合、低または高地温による塊根肥大抑制の機構は両者で様相を異にすることがわかった。すなわち、低地温では木化の進行が少ない反面、第1次形成層の形成、活動が著しく抑制されること、また高地温では第1次形成層の発達は比較的順調であるが、導管周辺部柔組織の木化が著しいことのため

めに、ともに第2次形成層が形成されがたいことが肥大抑制の主因であると判断された。

4. 低または高地温によって細根に留まっていた根は、中地温に移すことにより再肥大をおこす。前者においては根の中央近傍の柔組織の活性化が、後者においては第1次形成層の活性化がおこり、その後、第2次形成層の形成、活動を伴う方向をとるものと考えられる。

5. 塊根組織の熱伝導の測定を試みた。上述した肥大の良好であった区の塊根は、吸熱側と放熱側の平均熱流量が比較的大なる傾向にあることがわかった。この一因として水分含量の差異が考えられるが、これを確認するために、数種の高、低澱粉品種の塊根を材料として、組織の水分含量と熱伝導率を測定した結果、両者間には密接な関係があることが推定された。しかし本実験においては供試材料が少ししか得られず、従って明確な結論は差し控えるが、今後、生体の温度反応に対する生理学的解明への一つのいとぐちになるのではないかと期待される。

Summary

The effect of soil temperature on the growth and the formation of tuberous roots of sweet potato was investigated during 39 and 60 days after transplanting. The treatments consisted of the factorial combination of three day and three night temperature: low (15°C), intermediate (25°C) and high (35°C), respectively.

The higher the soil temperature, the more vigorous was the growth of the top. The formation of the tuberous roots was the best under intermediate temperature condition, followed by the combination the intermediate and the low, or by that of the intermediate and the high, being poorest under low, and high temperatures and under the combination of these two sorts of temperature.

Under the low soil temperature, activity of the primary vascular cambium was strongly inhibited. Under the high soil temperature, the primary vascular cambium developed rather well, but the parenchyma cells around the vessels developed a marked lignification. In both cases, the following secondary vascular cambium formation was inhibited, and this, in turn, resulted in the inhibition of the thickening of the tuberous roots.

The roots which had remained in a non-tuberous stage under low or high soil temperature, initiated a thickening growth when transferred to intermediate soil temperature. It was considered that the parenchyma cells near the center of the roots became more active as the roots were transferred from low to intermediate temperature, while the primary vascular cambium increased activity when transferred from high to intermediate temperature. This resulted in the formation and higher activity of the secondary cambium.

The measurement of heat conduction of the tuberous root tissues revealed that in case of the tuberous roots growing thick and well the mean thermal flux between the heat absorption and the release sides tended to be comparatively higher. It was suggested that in the several cultivars containing low and high starches there was a close relationship between the water contents of the tissues and the rate of the heat conductance though a clear conclusion may not be drawn yet because of the fewer number of the tissues tested.

謝辞 なお、甘藷材料を提供して戴いた鹿児島県農業試験場の中間洋征氏と上妻道紀氏に感謝の意を表す。

文 献

- 1) 花田主計・小島 均：甘藷塊根形成と土壌温度。九州農業研究，第8号，47-48 (1951)
- 2) 長谷川 浩・八尋 健：甘藷の生育と地温との関係(第1報)。九州農業研究，第16号，83 (1955)
- 3) 長谷川 浩・八尋 健：高地温が甘藷の生育に及ぼす影響。日作紀，26，37-39 (1957)
- 4) 国分禎二：甘しょ品種の塊根の組織構造とでん粉蓄積能力との関係。鹿大農学術報告，No.23，1-126 (1973)
- 5) Kollmann, F: Principles of Wood Science and Technology. Vol 1, P. 246-250, Springer-Verlag (1968)
- 6) 宮里 満・植木健至・佐々木 修：植物組織における熱伝導の測定法について。鹿大農学術報告，No.33，159-164 (1983)
- 7) 長井 保・榎本中衛：異なる地温及び土壌水分下に於ける甘藷の生育について。日作紀，22，141 (1953)
- 8) 戸苺義次：甘藷塊根形成に関する研究。農林省農事試験場報告，68，1-96 (1950)