トウモロコシの生育に及ぼす高温処理の影響

長屋祐一*, 谷山鉄郎**, 安藤文章**, 鈴木康正**, 梅崎輝尚*

Effects of high daytime temperature on the growth of sweet corn (*Zea mays* L.)

Yuichi Nagaya*, Tetsuro Taniyama**, Fumiaki Ando**,
Yasumasa Suzuki** and Teruhisa Umezaki*

キーワード：トウモロコシ, 温暖化, 食糧生産, 高昼温

1. はじめに

地球温暖化の予測は、経済成長速度とグローバル化の進展度合を組合せた排出シナリオによって大きく異なる。日本の平均気温は、20 世紀末(1980～1999 年) から 21 世紀末(2090～2099 年) までに、シナリオ A2 で 4.0℃, シナリオ A1B で 3.2℃, シナリオ B1 で 2.1℃ 上昇し、いずれのシナリオでも世界の平均(3.4℃, 2.8℃, 1.8℃) を上回ると予測された(文部科学省ら, 2009)。この報告によると、気温が 4℃ 以上の上昇がみられた場合には、降水量の増加、ブナ林の減少、松枯れの増加など気象や生態系に及ぼす影響が大きい。代表的な農作物である水稻の収量も減少し、リンゴやウンシュウミカンの栽培不適地の増加が示唆されている。

人間の食糧や家畜の飼料として利用する主要な作物は、コムギ、イネ、トウモロコシである。トウモロコシは温帯の暖かい地方から湿潤な亜熱帯まで広く栽培され、栽培面積はコムギ、水稻について世界第 3 位を占める。トウモロコシは子実用のほか、生食・加工用、青刈りやサイレージ用として栽培されている(高崎, 1999)。

作物の生長は栄養生長から生殖生長へ移行ある

いは並進して成熟する。作物の収量は全乾物重あるいは地上部乾物重とこれらに占める収穫部位の割合との積であることから、作物に及ぼす適温を超える高温の影響は、生育経過、全乾物重、地上部乾物重などに現れると考えられる。トウモロコシは子実のみならず青刈も利用可能であることから、生育経過や乾物重に及ぼす温暖化の影響について調査することは、食糧や飼料の確保から重要である。

そこで、本報告では、トウモロコシの栽培について最適温度が 30℃ から 32℃ である(丹下, 1973)ことから昼温を 31℃ とした標準区と、これより 4℃ 高い昼温(高温区)を設定し、トウモロコシの生育と部位別乾物重、葉面積に及ぼす高昼温の影響について検討した。

2. 材料と方法

供試品種はトウモロコシの一代交配品種である甘味種を 2 品種(カラフルコーン, サニーショコラ)用いた。供試材料は、8 号のプラスチックポット(容量 8 リットル)に、赤玉土をポットの底に 1kg 敷き、未耕砂質土壌 3kg とゴールデン堆肥 1kg、基肥として化成肥料($\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 8:8:8$)

* 三重大学大学院生物資源学研究科 (〒 514-8507 津市栗真町屋町 1577)

** 中部大学応用生物学部 (〒 487-8501 春日井市松本町 1200)

*Graduate School of Bioresources, Mie University (1577 Kurimamachiya, Tsu, Mie, 514-8507, Japan)

E-mail nagaya@bio.mie-u.ac.jp

連絡責任者：長屋祐一 (nagaya@bio.mie-u.ac.jp)

**College of Bioscience and Biotechnology, Chubu University (1200 Matsumoto-cho, Kasugai, Aichi, 487-8501, Japan)

4.36gを混和充填した。生育のそろった2週間苗を8号のプラスチックポットに1個体定植した。カラフルコーンの播種日は2009年3月19日、追肥は5月3日（播種後45日目）と5月24日（播種後66日目）、サンプリングは6月11日（播種後84日目）であった。サニーショコラの播種日は2009年10月5日、追肥は11月6日（播種後32日目）、サンプリングは11月18日（播種後44日目）であった。追肥は前述の化成肥料を1回につき2.35g施用した。

栽培条件は2基の人工光型グロースキャビネット（小糸製作所、KG—V64型）を用いて、それぞれ高温区（昼温35℃、6時から19時／夜温25℃、19時から6時）と標準区（昼温31℃、6時から19時／夜温25℃、19時から6時）の2処理とした。人工光型グロースキャビネットの相対湿度は常時60%とした。また、明期の光量は、室内高150cmでラインセンサ(80cm)光量子計(Decagon, SUNFLECK CEPTOMETER)によって630 μ mol/m²/sであった。明－暗期の温度変化は、明期の始期と終期の2時間をかけて、一定の割合で設定温度に変化するように調節した。

各処理は人工光型グロースキャビネット内に15個体を設置した。それぞれの個体は室内環境の影響が少なくなるよう毎週場所を移動し、灌水は適宜行った。

草高は播種後14日目から7日ごと測定した。葉数は個体に着生した葉身のうち緑色部分が70%以上のものを対象に、カラフルコーンは播種後35日目から、サニーショコラは播種後14日目から7日ごと測定した。

サンプリングについて、カラフルコーンは播種後84日目、サニーショコラは播種後42日目に行った。まず地際から刈取り、地上部は葉身、雄穂、雌穂に切り分け、地下部は土壌を洗い落とし、その後、通風乾燥機によって80℃で恒量になるまで乾燥させ部位別乾物重を計測した。葉面積はサンプリング後に葉身部分を対象として自動面積計（林電工、AAM-9）にて測定した。地上部乾物重と地下部乾物重の比率であるTR率を算出した。

処理区間の比較はエクセル統計2004（社会情報サービス）を利用し、t検定にて行った。

3. 結果

カラフルコーンの草高について、播種後21日目に高温区が標準区と比較して5%水準で有意に高かったが、播種後28日目以降では高温区が標準区と比較して1%水準で有意に低かった。播種後42日目には全ての個体で雄穂抽出期に達した。両処理区とも播種後56日目以降の草高はほぼ一定であった（図1）。高温区の葉数は播種後49日目、77日目、84日目を除いて標準区より5%水準で有意に少なく推移した（図2）。登熟期の播種後84日目にサンプリングを行い、部位別に分けて乾物重を測定した。茎（稈＋葉鞘）乾物重、雄穂乾物重、地上部（葉身＋稈＋葉鞘＋雄穂＋雌穂）乾物重、地下部（根＋稈）乾物重および葉面積について、いずれも高温区は標準区より1%水準で有意に小さくなった。葉身乾物重、雌穂乾物重およびTR率は、処理区間に有意差はみられなかった（表1）。

図1. 草高の推移（カラフルコーン）

■：高温区、◆：標準区。縦棒は標準偏差（n=15）を示す。*は5%、**は1%水準で有意差がある。

図2. 緑色割合が70%以上の葉数（カラフルコーン）

■：高温区、◆：標準区。縦棒は標準偏差（n=15）を示す。*は5%、**は1%水準で有意差がある。

表1. 部位別乾物重と葉面積, TR 率 (カラフルコーン)

	葉身乾物重 (g)	茎(稈+葉鞘) 乾物重 (g)	雄穂乾物重 (g)	雌穂乾物重 (g)
高温区	18.6±1.8	84.5±12.3	7.0±1.1	11.3±5.6
標準区	19.6±2.6	124.8±13.1	8.9±1.6	15.5±8.1
有意差		**	**	
	地上部(葉身+ 葉鞘+稈+雄 穂+雌穂)乾物 (g)	地下部(根+ 稈)乾物重 (g)	葉面積 (cm ²)	TR率
高温区	121.3±11.5	7.4±1.3	2173±194	16.6±2.5
標準区	168.9±12.8	10.9±1.8	2492±283	16.0±3.4
有意差	**	**	**	

数値は平均値±標準偏差 (n=15)を示す。**は1%水準で有意差がある。

サニーショコラの草高について, 播種後 28 日目を除き, 高温区が標準区と比較して 5%水準で有意に低かった (図3)。葉数は 35 日目まで両処理区とも同様に推移し, 播種後 42 日目には高温区が標準区より 1%水準で有意に多くなった (図4)。全ての個体で雄穂抽出期に達した播種後 42 日目にサンプリングを行い, 部位別に分けて乾物重を測定した。茎 (稈+葉鞘+雌穂) 乾物重, 雄穂乾物重, 地上部 (葉身+稈+葉鞘+雄穂+雌穂) 乾物重および地下部 (根+稈) 乾物重について, いずれも高温区は標準区より 1%水準で有意に小さくなった。高温区の葉面積は, 標準区より 5%水準

図3. 草高の推移 (サニーショコラ)

■: 高温区, ◆: 標準区。縦軸は標準偏差 (n=15) を示す。*は 5%, **は 1%水準で有意差がある。

図4. 緑色割合が70%以上の葉数 (サニーショコラ)

■: 高温区, ◆: 標準区。縦軸は標準偏差 (n=15) を示す。**は 1%水準で有意差がある。

で有意に小さくなった。葉身乾物重および TR 率は, 処理区間に有意差はみられなかった (表2)。

また, 両品種とも人工光型グロースキャビネット内で栽培した高温区のトウモロコシは, 標準区と比較して葉身の葉焼け, 雄穂の開葯不良などが観察された。

表2. 部位別乾物重と葉面積, TR 率 (サニーショコラ)

	葉身乾物重 (g)	莖(稈+葉鞘 +雌穗)乾物重 (g)	雄穗乾物重 (g)	
高温区	9.7±1.0	20.9± 7.1	6.0±1.3	
標準区	10.4±1.2	45.3±11.6	7.5±1.4	
有意差		**	**	
	地上部(葉身+ 葉鞘+稈+雄 穗+雌穗)乾物 (g)	地下部(根+ 稈)乾物重 (g)	葉面積 (cm ²)	TR率
高温区	36.6± 7.1	8.1±2.9	1919±220	4.9±1.4
標準区	63.1±12.9	16.6±4.4	2122±380	4.2±1.7
有意差	**	**	*	

数値は平均値±標準偏差 (n=15)を示す。**は1%水準, *は5%水準で有意差がある。

4. 考察

トウモロコシの生育に及ぼす高昼温の影響について 2 品種を用いて検討した結果, 両品種とも草高は高温区が標準区より低く推移した (図1, 図3)。草高が最高位に達するまでは草高と乾物重は比例して大きくなることから, 雄穂抽出期を過ぎてサンプリングしたサニーショコラでは茎乾物重, 雄穂乾物重, 地上部乾物重, 地下部乾物重について高温区が標準区より小さくなった (表2)。登熟期まで栽培したカラフルコーンは, 雄穂抽出期を過ぎて草高が一定となって推移したが, サンプリング時における茎乾物重, 雄穂乾物重, 地上部乾物重, 地下部乾物重について高温区が標準区より小さくなった (表1)。以上のことから高温区の部位別乾物重の減少は, 両品種で共通してみられた。

植物は光合成作用と呼吸作用の差引きによって光合成産物を蓄積し, 乾物重が増加する (窪田, 1999)。トウモロコシの主要な光合成作用は葉身部分で行われ, 葉面積と単位面積あたりの光合成速度の積で概算される。トウモロコシ葉身の着生状況について, 光合成を行う緑色部分が葉身全体の 7 割以上ある葉数を計測したところ, カラフルコーンでは高温区が標準区より概して少なく (図2), また葉面積ならびに葉身乾物重についても高

温区が標準区より小さかった（表1）。一方、サニーショコラは葉数についてはほぼ同様であったが、葉面積ならびに葉身乾物重については高温区が標準区より小さかった（表2）。両品種の栽培期間は異なるが、共通して高昼温により葉身の面積および乾物重が減少した。高温区では人工光源に近い葉身の一部が白くなるものが見られたことから、高温と強光により葉緑体の壊死が生じることにより、光合成の場である葉身の葉面積が標準区より減少すると考えられた。

Ben-Asher et al. (2008) は、昼温／夜温を変えてポット栽培したトウモロコシの葉身について個葉光合成活性を測定したところ、40℃／35℃で栽培したトウモロコシの真の光合成速度は25℃／20℃の50～60％程度と低くなったと報告した。Murata et al. (1965) は、トウモロコシの幼植物を用いて個体の真の光合成速度に及ぼす気温の影響について検討したところ、30～35℃までは同程度で、35℃以上になると低下すると報告した。よってトウモロコシは昼温が35℃以上になると光合成速度が低下すると思われる。一般に光合成速度は、光量、気温、湿度、植物体の水分状態、栄養状態などの要因に影響される。本報告では、昼温は異なるが相対湿度60％条件下での栽培を行った。昼温が35℃の飽差は31℃より大きいので蒸散量が大きくなると考えられる。水稻の生育や光合成速度に及ぼす湿度の影響については平井ら（1989）、平井ら（1993）の報告があるが、トウモロコシに及ぼす湿度の影響について詳細な検討がなされていないことから、高昼温に及ぼす湿度の影響については今後の課題である。

本報告では栽培期間が異なる供試材料を用いたが、両者ともに高昼温により乾物重の低下がみられた（表1、表2）ことから、高昼温によってトウモロコシの光合成速度は低下し、葉面積が減少することにより全体の光合作用が低下したため、乾物重が低下したと推測された。また地上部と地下部の比率を示すTR率には高温の影響がみられなかった（表1、表2）ことから、乾物重の蓄積は気温の違いに関わらず地上部、地下部ともに同じ程度に蓄積すると思われた。

トウモロコシの利用形態は完熟した子実のほか、子実が完熟する前の生食・加工あるいは地上

部全てを対象とした青刈り状態で利用可能である（高崎，1999）。食糧や飼料として利用可能な完熟した子実について、高昼温により乾物重が低下することで、子実重も同様に減少することが予想される。一方で、子実は雄穂の花粉が風媒によって運ばれ受精した後、光合成産物の転流が開始され発育する（高崎，1999）。本報告の高温区では両品種ともに雄穂の葯に開花不良がみられたため、高温処理によって不稔の子実が増加すると予想される。したがって、乾物重の低下と不稔の増加により、高温処理により子実重の減少が予想された。

高温ストレスは植物の生長適温を上回る程度の高温下で生育した場合に現れるストレスである。この高温ストレスは、高温が生育適温からどれくらい上回る温度なのかと接触する時期と期間によって障害の現れ方が異なる（伊藤，1994）。本報告では全生育期間について昼温の高温処理を行い、栄養生長と生殖生長の双方に負の効果がみられた。温暖化によって今後予想される気温の上昇は、昼温だけでなく夜温の上昇も考えられることから、夜温の上昇も考慮した高温の影響について、さらに検討を続ける必要がある。

引用文献

- Ben-Asher, J., A. Garcia Y Garcia & G. Hoogenboom (2008) Effect of high temperature on photosynthesis and transpiration of sweet corn (*Zea mays* L. var. rugosa), *Photosynthetica* 46 (4), 595-603.
- 平井源一・中山 登・北宅善昭・稲野藤一郎・中條博良・湊 公美・田中 修 (1989) 大気湿度が水稻の生育ならびに生理に及ぼす影響：第6報 大気湿度が水稻模擬個体群の光合成速度に及ぼす影響，*日作紀*，58 (3)，368-373.
- 平井源一・中條博良・田中 修・奥村俊勝・竹内史郎・平野高司・大森雅代 (1993) 大気湿度が水稻生育ならびに生理に及ぼす影響：第8報 種々の気温における幼植物の乾物生産と窒素吸収に及ぼす大気湿度の影響，*日作紀*，62 (3)，395-400.
- 伊藤亮一 (1994) 6. 塩・温度ストレスと作物の生長，*植物生産生理学*，132-144，朝倉書店。
- 窪田文武 (1999) 7. 品種改良の目標と生理生態的

- 形質, 作物学総論, 143-161, 朝倉書店.
- 文部科学省・気象庁・環境省 (2009) 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」, 25-45.
- Murata, Y., J. Iyama & T. Honma (1965) Studies on the Photosynthesis of Forage Crops : IV. Influence of air-temperature upon the photosynthesis and respiration of alfalfa and several southern type forage crops. Proc. Crop Sci. Soc. Japan, 34,154-158.
- 高崎康夫 (1999) 1.7 トウモロコシ, 作物学各論, 38-48, 朝倉書店.
- 丹下宗俊 (1973) 1. 気象条件, V 環境, 作物学, 137-154, 朝倉書店.