2025年度（第50回）学術研究振興資金　学術研究報告

学　校　名	**東　京　農　業　大　学**	研究所名等	
研 究 課 題	高温ストレスの長さや強度に応じた植物の多層的高温適応機構解明 －植物の高温耐性寄与遺伝子の同定と動物高温耐性機構への展開－	研 究 分 野	農　　学
キ ー ワ ー ド	①環境応答、②高温耐性、③シロイヌナズナ、④線虫、⑤多様性		

〇研究代表者

氏　　名	所　　属	職　　名	役　割　分　担
太　治　　輝　昭	東京農業大学生命科学部	教　　授	研究代表者・総括

〇研究分担者

氏　　名	所　　属	職　　名	役　割　分　担
久　　原　　篤	甲南大学理工学部	教　　授	研究分担者・線虫に関する実験

高温ストレスの長さや強度に応じた植物の多層的高温適応機構解明
－植物の高温耐性寄与遺伝子の同定と動物高温耐性機構への展開－

1. 研究の目的

本研究の学術的背景

近年の気温上昇が作物収量を減少させており、植物の高温耐性メカニズムの解明と耐性作物の作出が植物科学の重要な課題となっている。植物の高温ストレス応答については、これまでにシロイヌナズナを含むモデル植物を中心に研究が進められ、細胞レベルにおける Heat Shock Factors A1 (HsfA1s)を介した数分から 1 時間の素早くダイナミックな転写ネットワーク、個体レベルにおける PIF4 を介した数時間で茎の伸長や下偏成長（葉を立ち上げる）を誘導する熱形態形成が知られている。これらは時空間的にも独立して議論されており、ステージゲートの存在が示唆されるものの、両ステージにまたがる因子の同定や、多層的な適応機構の理解には至っていない。

シロイヌナズナは世界中の様々な地域に生息し、その野生系統数は 2000 以上に上る。これらは様々な環境条件に適応した結果、同じ種でありながらストレス耐性に大きな違いがあることが明らかとなってきた。先行研究において、シロイヌナズナ野生系統の「短期間の極端な高温ストレス（42℃_50 分間)」と「長期間続く高温ストレス（37℃ _7 日間)」に対する耐性（以後、前者を短期高温耐性、後者を長期高温耐性とする）を評価したところ、それぞれの高温耐性に大きな多様性が認められた。興味深いことに、長期高温耐性を示す野生系統は必ずしも短期高温耐性を示さず、それぞれの耐性は独立したメカニズムに因ることが示唆された。

研究課題の学術的「問い」

植物は高温ストレスの長さや強度に応じて、複数のステージゲートを設けることで応答の最適解を選択している。しかし、段階的に見えるこれらステージゲート応答も実際に植物は時間重複しながら同時多面的に応答しており、「ステージをまたがる因子」の同定や、「時間軸に沿ったシグナルネットワークの変遷・制御」の理解に至っていない。また、植物動物共通の温度制御機構についてはほとんど知見がない。

本研究の目的

そこで本課題では、以下の 1) ～ 3) の解析により、短期・長期高温ストレス応答に寄与する遺伝子群を同定し、その相同遺伝子が動物でも温度耐性に寄与しうるか線虫を用いて調べる。これにより、植物さらには動物の高温に対するレジリエンス機構の解明を目指す。

1) 短期高温応答ステージゲート機構に関する解析
2) 短期高温耐性に寄与する遺伝子の同定と解析
3) 長期高温耐性に寄与する遺伝子の同定と解析

2. 研究の計画

1) 短期高温応答ステージゲート機構に関する解析

先行研究より、*HsfA1* 過剰発現株が通常生育温度で茎の伸長、葉の巻き上がり（下偏生長）といった典型的な熱形態形成を示すこと、さらに気孔開口を介した蒸散を強力に促すことが明らかになった(未発表)。熱形態形成については、PIF4 を介したオーキシン応答やジベレリン応答が知られているが、*HsfA1s* との関連は不明である。また、*HsfA1s* がどのようにして気孔開口から蒸散を促すのかについては一切不明である。そこで本課題では、トマトおよびシロイヌナズナの *HsfA1* 過剰発現株および *hsfa1* 多重変異株を用いて、*HsfA1s* がどのようなプロセスで熱形態形成・蒸散に至るのかを明らかにする。

2) 短期高温耐性に寄与する遺伝子の同定と解析

シロイヌナズナにおける短期高温耐性メカニズムの解明を目的に、短期高温に感受性を示した Col-0 種子に対して EMS による突然変異処理を行い、短期高温に耐性を示す変異株の単離を試みた。スクリーニングの結果、複数系統の *short-term*（*s-*） *heat tolerant*（*sheat*）変異株を獲得した。これらの生理学的、遺伝学的解析を行う。

3）長期高温耐性に寄与する遺伝子の同定と解析

長期的な高温ストレス応答についてはこれまでに知見が乏しく、そのメカニズムに興味が持たれる。そこで野生系統間に見られる長期高温耐性の多様性に関する研究、および長期高温耐性が欠損した、*sensitive to long-term heat*（*sloh*）変異株の単離・解析を進めてきた。これまでに原因遺伝子座が異なる8つの*sloh*変異株を単離したが、全ての*sloh* 変異株の短期高温耐性は野生型と同等、かつ、短期高温応答に重要な *HsfA1* や *HSP* 遺伝子群の発現量も野生株と同等であり、本研究が位置づける短期・長期高温応答の間にはステージゲートの存在が示唆された。そこで本課題では、未だ原因遺伝子の特定や機能解析に至っていない残り4つの *sloh* 変異株の解析を進める。

3. 研究の成果

1）短期高温応答ステージゲート機構に関する解析

RNAseq および ChIP-seq 解析より、熱形態形成と蒸散に寄与しうる *HsfA1* の制御遺伝子候補を見出した。そこで *HsfA1* 過剰発現株および *hsfa1* 多重変異株における候補遺伝子群の発現解析を行った。その結果、オーキシン、ジベレリン応答に加えて、ジャスモン酸応答関連遺伝子群が *HsfA1* の制御を受けることが明らかとなった。また、シロイヌナズナに加えて、トマトにおける *hsfA1* 多重変異株の作出を進めた。トマトのゲノム上には *HsfA1* 遺伝子は 4 つ存在する。シロイヌナズナの先行研究から、4 つの *HsfA1* 遺伝子群は重複した機能を有することが知られており、三重、ないしは四重変異株の作出が必要と考えられる。本年度は三重変異株の作出に成功した。

2）短期高温耐性に寄与する遺伝子の同定と解析

これまでに単離した *sheat* 変異株の短期、あるいは長期高温ストレス耐性を評価した結果、いずれの *sheat* 変異株も、短期高温ストレスにのみ特異的に耐性を示した。遺伝学的解析に加えてゲノムシークエンス解析を実施した結果、*sheat3* 変異株については、マッピング領域内の 1 遺伝子のみに 1 アミノ酸置換を誘導する変異を発見した。現在、当該遺伝子が原因遺伝子であるのか確認するため、野生株から当該遺伝子をクローニングして *sheat3* 変異株に導入する相補試験の準備を進めている。

3）長期高温耐性に寄与する遺伝子の同定と解析

長期高温ストレスに高感受性を示すシロイヌナズナ変異株のうち、*sloh7*、および *sloh29* 変異株の原因遺伝子の同定に成功した。原因遺伝子はこれまで同定した他の *sloh* 変異株と異なるため、新たなシロイヌナズナにおける長期高温耐性機構が明らかになると期待される。

4. 研究の反省・考察

本研究予算で自動表現型解析システム RIPPS の導入（2025 年度_育苗ポット自動搬送装置本体、2026 年度_各種カメラ撮影装置）を計画している。予定通り今（2025）年度は、RIPPS 育苗ポット自動搬送装置本体を導入した。RIPPS は 82 ポットの土壌水分量を厳密に制御可能なため、水分量に左右されない高温耐性評価が可能である。RIPPS には多様なセンサーが搭載されており、植物の生育速度や色彩変化、蒸散や水分分布などを非破壊で経時的に数値化できる。来（2026）年度から RIPPS を本格運用し、トマトの *hsfA1* 多重変異株をはじめ、シロイヌナズナ野生系統や突然変異株の表現型解析を実施する。

植物動物共通の温度制御機構については、共同研究者である甲南大学の久原篤博士と共同で、これまでに同定してきた植物の高温耐性に関与する遺伝子群の線虫ホモログについて、その変異株や遺伝子発現抑制系統を用いた解析を進めている。まだ解析はこれからであるものの、現状ほとんど知見のない植物動物共通の温度制御機構が明らかになると期待される。

5. 研究発表

(1)学会誌等

①Kobayashi K, Murakoshi Y, Kanamori K, Hidema J, Masuda G, Tanaka K, Yotsui I, Sakata Y, Taji T. UVH6 regulates osmotic and heat stress tolerance by modulating transcription. Frontiers in Plant Science 2025: 16: 1623563. doi:

10.3389/fpls.2025.1623563

(2)口頭発表

①発表者名:Asuka Ogawa, Mire Yanagihara, Goro Masuda, Izumi Yotsui, Yoichi Sakata, Teruaki Taji
発表標題：シロイヌナズナの短期高温耐性獲得変異株の解析
学会等名：日本植物生理学会

②発表者名:Haruomi Yoshino, Yusuke Murakoshi, Ryo Yamaguchi, Akito Hosoi, Takamasa Suzuki, Izumi Yotsui, Yoichi Sakata, Teruaki Taji
発表標題：シロイヌナズナ長期高温感受性変異株 *sloh2* の原因遺伝子同定
学会等名：日本植物生理学会

③発表者名：Asumi Kitashima, Goro Masuda, Izumi Yotsui, Yoichi Sakata, Teruaki Taji
発表標題：シロイヌナズナ野生系統 Berg-1 の長期高温耐性に寄与する遺伝子の探索
学会等名：日本植物生理学会

④発表者名：Haruto Kinoshita, Goro Masuda, Izumi Yotsui, Yoichi Sakata, Teruaki Taji
発表標題：シロイヌナズナ長期高温感受性変異株 *sloh12* の原因遺伝子同定
学会等名：日本植物生理学会

⑤発表者名：Ririka Nosuga, Akito Hosoi, Takamasa Suzuki, Izumi Yotsui, Yoichi Sakata, Teruaki Taji
発表標題：シロイヌナズナ長期高温感受性変異株 *sloh7* の機能解析
学会等名：日本植物生理学会

(3)出版物

なし