

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22431

研究課題名(和文) フィールド条件で植物の高温順化を制御するゲノム・エピゲノムの機能解析

研究課題名(英文) Heat acclimation under field conditions

研究代表者

山口 暢俊 (Nobutoshi, Yamaguchi)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号：90767899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：植物は固着して生きるため、芽生えたその地で刻々と変動する温度に適応しなければならぬ。特に、不規則に変動する温度を段階的に読み取るのが重要になるのが、高温順化の過程である。申請者は、植物が記憶をする原理を研究した。この研究で、エピゲノム因子であるJUMONJI (JMJ)が抑制的ヒストン修飾であるH3K27me3を除去することで、植物が高温を受けた経験をしばらく記憶することを明らかにした (Yamaguchi et al., 受理, Nature Com.)。

研究成果の学術的意義や社会的意義

申請者は、植物が記憶をする原理を研究し、エピゲノム因子であるJUMONJI (JMJ)が抑制的ヒストン修飾であるH3K27me3を除去することで、植物が高温を受けた経験をしばらく記憶することを明らかにした (Yamaguchi et al., 受理, Nature Com.)。この研究は植物の記憶の分子基盤の実体を明らかにした例として、国際的に高く評価された。

繰り返しやってくる高温の刺激に適応する仕組みを解明して操作することは、植物の生き残り戦略を知り、植物に対する気候変動の影響を軽減するための対策を講じていくうえでも非常に重要である。

研究成果の概要(英文)：Acclimation to high temperature increases plants' tolerance of subsequent lethal high temperatures. Although epigenetic regulation of plant gene expression is well studied, how plants maintain a memory of environmental changes over time remains unclear. Here, we show that JUMONJI (JMJ) proteins, demethylases involved in histone H3 lysine 27 trimethylation (H3K27me3), are necessary for Arabidopsis thaliana heat acclimation. Acclimation induces sustained H3K27me3 demethylation at HEAT SHOCK PROTEIN22 (HSP22) and HSP17.6C loci by JMJs, poising the HSP genes for subsequent activation. Upon sensing heat after a 3-day interval, JMJs directly reactivate these HSP genes.

研究分野：Plant physiology

キーワード：Plant physiology

1. 研究開始当初の背景

動物とは異なり、植物は脳のような情報を集積するシステムを持たないため、情報を集積することなく、環境から得た情報をすぐに感知し、応答することが重要であると予想されてきた。そのため、これまでの研究では秒・分単位で起こる短期的な応答(重力や光への反応など)に重点が置かれてきた。しかし、エピジェネティクスの研究の進展により、遺伝子発現の変化をヒストンの修飾パターンの違いとして記憶し、長期的な応答を制御可能であることがわかってきていた。

2. 研究の目的

我々は、ヒストン H3 にある 27 番目のリジンのトリメチル化を除去するはたらきを持つヒストン脱メチル化酵素である JUMONJI(JMJ)が、高温の経験を記憶するために必要であるという予備的なデータを得ている。そこで、植物が高温に対する適応能力を発揮する記憶の分子基盤を明らかにし、“植物の記憶力を向上する”方法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) JMJ の下流の遺伝子発現が高温順化のために必要である。

中程度高温によって順化をさせて、一定時間経過したのちに高温を与えた場合、野生型は高温順化して、耐性を保持した。しかし、*jmj* 変異体では、高温順化する能力が低く、耐性を維持しにくくなることがわかった。

(2) JMJ はヒストン修飾を介して HSP の発現を制御する。

RNA-seq と ChIP-seq により、JMJ によって遺伝子発現とヒストン修飾が制御される遺伝子をゲノムワイドに同定した。HSP から H3K27me3 の修飾が取り除かれること、H3K4me3 の修飾が残ることにより記憶が作られることがわかった。

(3) 高温順化前に JMJ を誘導すると、*jmj* 変異体を相補できる。

jmj 変異体背景で JMJ を誘導可能な系を作製した。高温順化前に JMJ を誘導すると、遺伝子発現とヒストン修飾が回復することで表現型が一部相補されることがわかった。

4. 研究成果

モデル植物のシロイヌナズナを使って実験を重ねた結果、高温にさらされると DNA を巻き取る働きがあるヒストンタンパク質のメチル化状態が変化したまま維持されることを突き止めた(図 1)。熱ショックタンパク質をコードする遺伝子を抑制するように働くヒストンのメチル化修飾をしばらくの間取り除いた状態で維持しているために、繰り返されてくる高温の刺激に速やかに応答することを明らかにした(図 2)。さらに日本各地の温度条件に応答した遺伝子の発現を数理シミュレーションで予測

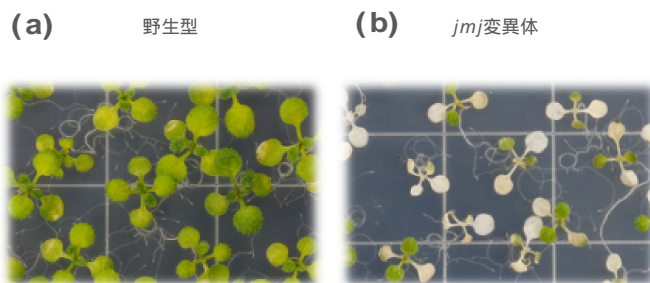


図 1. 繰り返される高温の刺激を与えた植物

(a) 野生型は生存できる.

(b) H3K27me3 を除去できない *jmj* 変異体は生存できない.

し、人為操作して高温耐性を付与することにも成功した。繰り返してやってくる高温の刺激に適応する仕組みを解明して操作することは、植物の生き残り戦略を知り、植物に対する気候変動の影響を軽減するための対策を講じていくうえでも非常に重要である。

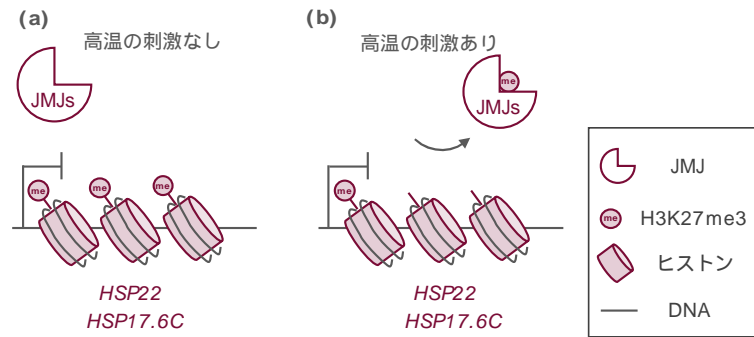


図 2 . 繰り返される高温に応答したヒストン修飾の変化

(a) 高温の刺激がない場合、H3K27me3 がついている。

(b) 高温の刺激がある場合、JMJs が H3K27me3 を除去した状態を維持する。

Pelayo, M.A., Yamaguchi, N.*, and Ito, T*. (2021) One factor many systems: The floral homeotic protein AGAMOUS and its epigenetic regulatory mechanism. *Current Opinion in Plant Biology* **61**, 102009. (*Co-corresponding author)

Yamaguchi, N.*, Matsubara, S., Yoshimizu, K., Seki, M., Hamada, K., Kamitani, M., Kurita, Y., Nomura, Y., Nagashima, K., Inagaki, S., Suzuki, T., Gan, E.-S., To, T., Kakutani, T., Nagano, A.J., Satake, A., and Ito, T.* (2020) H3K27me3 demethylases alter *HSP22* and *HSP17.6C* expression in response to recurring heat in *Arabidopsis*. bioRxiv doi: <https://doi.org/10.1101/2020.05.10.086611> (*Nature Communications Accepted*). (* Co-corresponding author)

Wu, J., Yan, M., Zhang, D., Zhou, D., Yamaguchi, N.*, and Ito, T*. (2020) Histone demethylases coordinate the Antagonistic interaction between abscisic acid and brassinosteroid signaling in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science* **11**, 596835. (*Co-corresponding author)

Wang, Y., Kumaishi, K., Suzuki, T., Ichihashi, Y., Yamaguchi, N., Shirakawa, M., and Ito, T. (2020) Morphological and physiological framework underlying plant longevity in *Arabidopsis thaliana*. *Frontiers in Plant Science* **11**, 600726.

Zhu, Y., Klasfeld, S., Jeong, CW., Jin, R., Goto, K., Yamaguchi, N., and Wagner, D. (2020) TERMINAL FLOWER1-FD complex target genes and competition with FLOWERING LOCUS T. *Nature Communications* **11**, 5118.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wu, J., Ichihashi, Y., Suzuki, T., Shibata, A., Shirasu, K., Yamaguchi, N. and Ito T.	4. 巻 42
2. 論文標題 Abscisic acid-dependent histone demethylation during postgermination growth arrest in Arabidopsis.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant Cell and Environment	6. 最初と最後の頁 2198-2214
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wu, J., Yamaguchi, N. and Ito T.	4. 巻 14
2. 論文標題 histone demethylases control root elongation in response to stress-signaling hormone abscisic acid.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant Signaling and Behavior	6. 最初と最後の頁 1604019
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xu Y., Yamaguchi, N. Gan, E-S., and Ito, T.	4. 巻 70
2. 論文標題 When to stop: an update on molecular mechanisms of floral meristem termination.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Botany	6. 最初と最後の頁 1711-1718
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sun, B., Zhou, Y., Cai, J., Shang E., Yamaguchi, N., Xiao, J., Looi, L-S., Wee W-Y., Gao, X., Wagner, D., and Ito, T.	4. 巻 31
2. 論文標題 Integration of transcriptional repression and Polycomb-mediated silencing of WUSCHEL in floral meristems.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant Cell	6. 最初と最後の頁 1488-1505
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ze Hong, L., Hirakawa, T., Yamaguchi, N., Ito, T.	4. 巻 20
2. 論文標題 The roles of plant hormones and their interactions with regulatory genes in determining meristem activity.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journals of Molecular Sciences	6. 最初と最後の頁 4065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Goh, T., Toyokura, K., Yamaguchi, N., Okamoto, T., Uehara, T., Kaneko, S., Takebayashi, Y., Kasahara, H., Ikeyama, Y., Okushima, Y., Nakajima, K., Mimura, T., Tasaka, M., and Fukaki, H.	4. 巻 222
2. 論文標題 Lateral root initiation requires the sequential induction of transcription factors LBD16 and PUCHI in Arabidopsis thaliana.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 New Phytologist	6. 最初と最後の頁 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ze Hong, L., Tatsumi, Y., Ichihashi, Y., Suzuki, T., Shibata, A., Shirasu, K., Yamaguchi, N. and Ito T.	4. 巻 7
2. 論文標題 CRABS CLAW and SUPERMAN coordinate hormone-, stress-, and metabolic-related gene expression during Arabidopsis stamen development.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Ecology and Evolution.	6. 最初と最後の頁 437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------