



令和元年11月14日  
琉球大学

## 遺伝子の「乗り物」に何が起きている？： バッタの染色体に存在する驚異的多様性が明らかに

琉球大学農学部の立田晴記教授らの研究チームによる研究成果が英国の学術雑誌「Scientific Reports」電子版に掲載されました。

### <発表のポイント>

#### ◆どのような新しい発見をしたのか

北海道に生息するサッポロフキバッタは、大変珍しい、同じ種内でも全く異なる性を決定する仕組みを持つことが知られています。本種の染色体の構造や、染色体に含まれる遺伝子の位置や大きさを調べたところ、驚くほどのさまざまな変異が蓄積されていることが明らかになりました（通常は種や性で染色体の大きさや数が一定です）。

これまで本種では性染色体（X染色体）と常染色体の間に転座（染色体の構造変化）が生じることで、新たな性決定システムを獲得した集団が同種内に存在することが知られていましたが、染色体末端に見られる特異的なDNAの塩基配列が、染色体内部にも存在している集団があること、また性染色体にも遺伝子組成が全く異なるタイプがあることが示されました。遺伝子の「乗り物」である染色体は生物の多様性を生み出すはたらきをすることから、地球上の生命の多様性を理解する上で極めて重要な知見です。



（写真） サッポロフキバッタ（上がオス、下がメス。撮影：立田晴記）

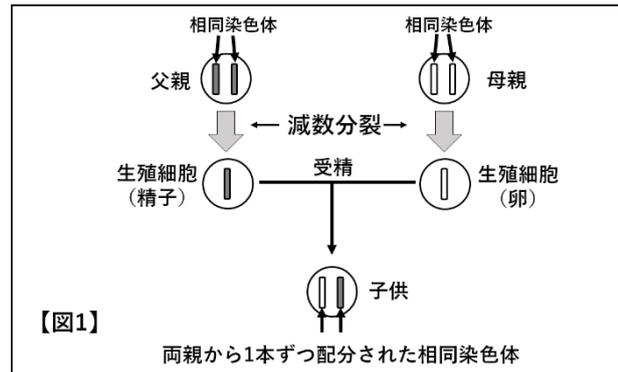
#### ◆社会的意義／将来の展望

今回発見された染色体の多様性は、地球上の生命の多様化の仕組みを理解するだけにとどまらず、染色体の構造変化が原因となって引き起こされる遺伝病の解明などにも役立つ可能性があります。今後も染色体の多様化を引き起こす原因の探索と、染色体の変化が個体の繁殖や生存に与える影響について詳しく調査していく必要があります。

## PRESS RELEASE

### < 発表概要 >

琉球大学農学部の Beata Grzywacz（ベアータ・グジュバッチ）博士研究員（当時：現ポーランド科学アカデミー研究員）、立田晴記教授らの研究グループは、北海道に生息するバッタの1種であるサップロフキバッタ (*Podisma sapporensis* Shiraki) の細胞中に含まれる染色体について研究してきました。染色体は細胞に含まれる核に存在しており、性別を決める役割を担う「性染色体」と性染色体以外の「常染色体」に分類されます。また生物の体をつくる設計図である遺伝子の発現と伝達を担う生体物質として知られています。常染色体が親から子へ伝わる様子を（図1）に示しました。卵や精子といった生殖細胞が減数分裂によってつくられるときには「相同染色体」と呼ばれる大きさやかたちと同じ染色体が2本ずつならび、それぞれ1本ずつが生殖細胞に配分されます。つまり生殖細胞どうしが受精してできる子供の細胞には、両親から1本ずつ配分された相同染色体が存在することになります。



性染色体については少々話が複雑です。ショウジョウバエやヒトなどには2種類の性染色体（X染色体、Y染色体）があり、オスではX染色体とY染色体1本ずつ、メスではX染色体を2本持っています。減数分裂の際、精子にはX染色体もしくはY染色体1本が配分され、卵には2本のX染色体のうち1本が配分されます。X染色体を持つ精子と卵が受精するとメスが、Y染色体を持つ精子と卵が受精するとオスが誕生します。しかしサップロフキバッタには通常Y染色体が存在せず、性染色体はX染色体だけです。オスでは1本のX染色体しか持たないため、精子にはX染色体を含むものと含まないものが存在します。X染色体を持つ精子が受精するとメスの子供が（性染色体はXX）、X染色体を持たない精子が受精するとオス（性染色体はX0、0はXの相同染色体が存在しないという意味）が誕生するのです。

**サップロフキバッタの染色体の不思議：** 大変興味深いことに、サップロフキバッタには、オスがX染色体を1本、メスが2本持つ「本来の集団（X0/XX 集団）」と、X染色体が常染色体に転座(translocation)を起こして生じた性染色体を持つ「新しい集団（XY/XX 集団）」が存在します (Bugrov et al. 2000)。X染色体と常染色体との間におこる転座によって、転座をおこした染色体が「新しいX染色体」に、転座を起こす前に存在していた“相棒”の染色体が「新しいY染色体」に生まれ変わるので（図2）。（図3）左は本来のサップロフキバッタのオスが持つ染色体ですが、転座が生じることで、右に示されるような染色体をオスは持つようになります（矢印は転座を起こした新しいX染色体）。メスでは転座が生じたX染色体を2本持ちます。新しいXY/XX 集団は北海道東部地域にのみ分布すること、また近縁種などではX0/XX 集団が標準であることから、X0/XX 集団の一部に転座が生じ、東部で分布を拡げたと考えられています (Tatsuta

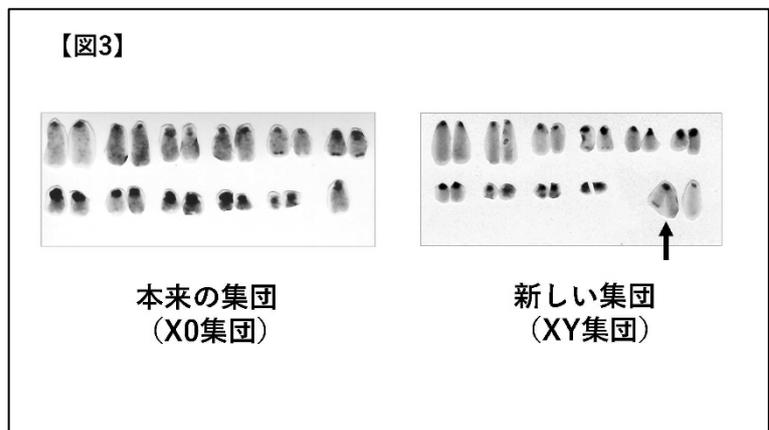
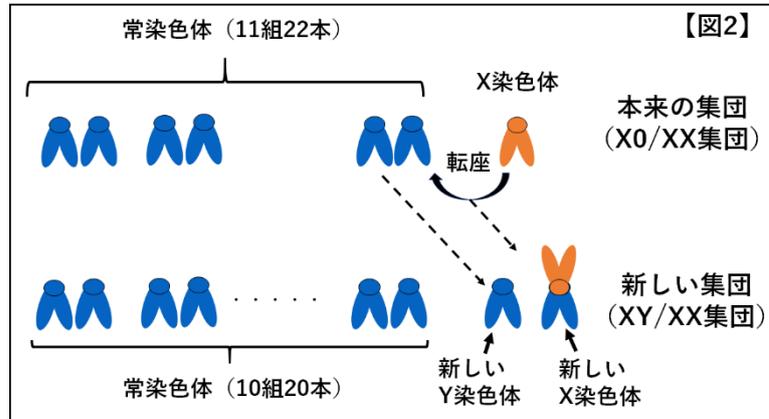
## PRESS RELEASE

et al. 2006). XY/XX 集団が誕生し、何故分布を拡げられたのかについては謎のままです。XY/XX 集団が分布する地域には古いタイプの性染色体を持つ個体が存在しないことから、本来 X0/XX 集団が北海道東部にも分布していたとすれば、あとから誕生した XY/XX タイプの個体が古い X0/XX タイプの個体を駆逐してしまった可能性があります。それが本当なら、なぜ XY/XX タイプの個体は X0/XX タイプの個体よりも有利に立つことができたのでしょうか？この謎を解き明かすため、我々は様々な角度から研究を進めてきました。

**構造を変える染色体：**サッポロフキバツタで見られるような、染色体のかたちや大きさに違いが生じた個体がどのように集団中で数を増やし、分布を拡げていくのかについては不明な点が多く、未だに多くの議論がされています。染色体

のかたちの変化がきっかけとなり、本来同じ種であった生物が互いに繁殖できなくなり、別の種へと変わっていくという学説は「染色体種分化 (chromosome speciation) モデル」と呼ばれており、学説を提唱した White 博士らは、オーストラリアに生息し、サッポロフキバツタ同様、染色体に違いが含まれるバツタを材料に研究を進めました (Kawakami et al. 2011)。近年では、染色体が変化することで、個体の繁殖や生存に有利な遺伝子群が保護されたり、集団中に有利な遺伝子群が拡がりやすくなるといった現象に果たす役割に注目が集まっています (Ayala & Coluzzi 2005 など)。

**研究のはじまり：**「染色体種分化モデル」を確かめるには、染色体に違いを含んだ生物を対象に研究する必要がありますが、そのような昆虫はバツタの他、ショウジョウバエや蚊といった一部のグループに限られています。そのような中、我々が研究を進めてきたサッポロフキバツタは染色体種分化モデルを検証する材料としてうってつけです。我々はこれまでもバツタ染色体に着目した調査を進めてきました。染色体の大きさやかたちが異なることで繁殖が妨げられるのなら、転座を起こした集団と起こしていない集団をかけ合わせると、その子孫は誕生しないか、生まれても何らかの不具合が子孫にあらわれるはずですが、そこで野外から異なるタイプの染色体を持つ個体を持ち帰り、室内でかけ合わせをしてみました。すると驚くことに、生まれる卵の数は若干少なくなるものの、交雑で生まれた子孫の多くが正常に発



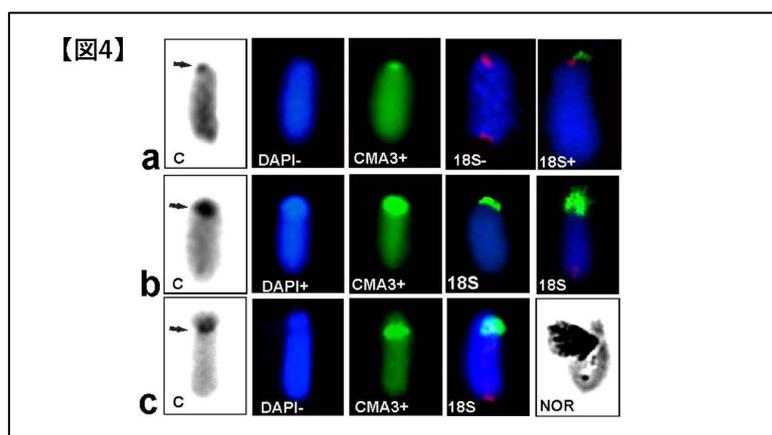
## PRESS RELEASE

育することがわかりました (Warchalowska-Sliwa et al. 2008). しかし使用する集団の組み合わせを変えると交雑が失敗することもあることから、染色体のかたちや大きさの違いが交雑を妨げる直接的要因になっている訳ではなく、染色体に含まれる何らかの遺伝子の違いが交雑の成功可否に関与している可能性が考えられます。

**2つの実験方法：**こうした結果を念頭に、我々は染色体に含まれる特徴的な遺伝子配列の位置や数などを推定するため、異なる実験的手法をもちいました。バツタは北海道内の異なる22の場所から、合計165個体のオス染色体を調査しました。染色体を調べる手法の1つはヘテロクロマチンと呼ばれる、クロマチン (= 真核細胞に存在するDNAとタンパク質の複合体) が凝集している部位を特定できるCバンド染色法、もう1つは特徴的な遺伝子配列を見つけるため、「プローブ」と呼ばれるDNAに蛍光のしるしを付け、染色体の特徴的な配列の位置や数を推定するための方法 (= 「蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション(FISH)法」) をもちいました。FISH法はヒトの染色体異常症候群の調査にも利用されています。

**明らかになった染色体内の多様性：**その結果、サッポロフキバツタでは実にさまざまな遺伝変異が染色体内部に存在していることが新たにわかりました。まず、ゲノムの安定性を失う原因となり得る「間質性テロメアリピート(interstitial telomeric repeats: ITRs)」が発見されました。「テロメア」と呼ばれる染色体の末端部には、「サテライト配列」といった同じDNA配列が何回も反復している部分が存在しますが、特徴的なサテライト配列がテロメア以外にも存在することがあり、それがITRsと呼ばれています(Bolzan 2013)。今回の調査で、染色体の異なる位置にITRsを持つ集団を複数発見しました。ITRsは異なる染色体どうしがくっつき、その後一部が断裂することで生じると考えられており、こうしたイベントが複数の集団で並行して生じたことを示唆しています。

さらに、遺伝子の位置や配列が異なる性染色体(X染色体)の存在を新たに確認しました(図4)。図中のa,b,cはいずれも場所が異なるX0/XX集団由来のオスのX染色体ですが、赤や緑で染色された部位の位置や大きさが違っているのが確認できます。これまではX染色体に種内で大きな違いはないと考えられてきましたが、実際はそうでは



なく、染色体内の遺伝子の位置や配列が生息場所に依って変化していることが新たにわかりました。こうした染色体に含まれる遺伝子の違いが、交雑によって生まれる子孫の生存・繁殖能力に大きな影響を与えている可能性があります。



## PRESS RELEASE

**社会的意義・今後の予定：**今回の研究から明らかになった染色体に存在する遺伝子の違いが、どのように個体の生存・繁殖に影響するのか、また遺伝子の違いを手がかりに XY/XX 集団が誕生し、分布を拡大できた理由を究明することが必要です。また今回発見された ITRs などは、時にゲノムの不安定化を招き、がんなどの病気の原因にもなり得ることが指摘されています

(Aksenova et al. 2013)。我々の研究は生物多様性の解明といった問いに目が向けられています。得られた知見は難病の治療といった分野にも成果が役立てられるかもしれず、今後も多角的な視点から研究を進める必要があると考えています。



## PRESS RELEASE

### 引用文献

- Aksenova, A. Y., P. W. Greenwell, M. Dominiska, A. A. Shishkin, J. C. Kim, T. D. Petes, and S. M. Mirkin. 2013. Genome rearrangements caused by interstitial telomeric sequences in yeast. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 110: 19866-19871.
- Ayala, F. J., and M. Coluzzi. 2005. Chromosome speciation: Humans, *Drosophila*, and mosquitoes. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 102: 6535-6542.
- Bolzan A. D. 2012. Chromosomal aberrations involving telomeres and interstitial telomeric sequences. *Mutagenesis* 27: 1-15.
- Bugrov, A. G., E. Warchalowska-Sliwa, H. Tatsuta, E. Pelepelov, and S. Akimoto. 2000. Distribution pattern of the XO/XX and neo-XY/neo-XX chromosomal races of the brachypterous grasshopper *Podisma sapporensis* (Orthoptera: Acrididae) in Hokkaido, northern Japan. *Entomological Science* 3: 693-699.
- Kawakami, T., R. K. Butlin, and S. J. B. Cooper. 2011. Chromosomal speciation revisited: Modes of diversification in Australian morabine grasshoppers (*Vandiemena*, *viatica* species group). *Insects* 2: 49-61.
- Tatsuta, H., S. Hoshizaki, A. G. Bugrov, E. Warchalowska-Sliwa, S. Tatsuki, and S. Akimoto. 2006. Origin of chromosomal rearrangement: a phylogenetic relationship between XO/XX and XY/XX populations in the brachypterous grasshopper *Podisma sapporensis* (Orthoptera: Acrididae). *Annals of the Entomological Society of America* 99: 457-462.
- Warchalowska-Sliwa, E, A. G. Bugrov, Y. Sugano, A. Maryanska-Nadachowska, and S. Akimoto. 2008. Experimental hybridization between XO and XY chromosome races in the grasshopper *Podisma sapporensis* (Orthoptera: Acrididae). II. Cytological analysis of embryos and adults of F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> generations. *European Journal of Entomology* 105: 45-52.

### < 論文情報 >

論文タイトル : Cytogenetic markers reveal a reinforcement of variation in the tension zone between chromosome races in the brachypterous grasshopper *Podisma sapporensis* Shir. on Hokkaido Island (北海道に生息する短翅性サップロフキバッタにおいて染色体レース間と緊張帯に存在する変異の強化が細胞遺伝学的マーカーによって明らかに)

掲載誌 : Scientific Reports

著者 : Beata Grzywacz\*, Haruki Tatsuta\*, Alexander G. Bugrov, Elzbieta Warchalowska-Sliwa

DOI 番号 : 10.1038/s41598-019-53416-7

アブストラクト URL: <http://www.nature.com/articles/s41598-019-53416-7>