

ホヤが細菌から獲得した遺伝子で身を守れるようになったわけ
遺伝子の水平伝搬による生物進化に関する新説の提唱

研究成果のポイント

1. 動物としては例外的にセルロースを合成するホヤのセルロース合成酵素遺伝子が進化した仕組みを解明しました。
2. ホヤは、セルロース合成酵素遺伝子の本体だけでなく、表皮でこの遺伝子を発現させる DNA を、遺伝子と一緒に細菌から獲得しました。
3. それが可能となった仕組みに関して新しい説を提唱しました。

国立大学法人筑波大学生命環境系の笹倉靖徳教授の研究グループは、東京大学の中井謙太教授、首都大学東京の西駕秀俊教授、広島大学の山本卓教授、高知大学の藤原滋樹教授の研究グループと共同で、ホヤのセルロース合成酵素が表皮で特異的に発現するようになった進化プロセスについての新説を提唱しました。

ホヤは、セルロースを合成して体を覆い、敵から身を守っています。ホヤのセルロース合成酵素遺伝子は、放線菌と呼ばれるグループの細菌から水平伝搬により獲得されたとされています。しかしながら、他の生物から取り込んだ遺伝子は通常は発現せず、働くことができません。細菌の遺伝子がホヤの祖先に取り込まれた後に発現するようになった仕組みについてはこれまで分かっていませんでした。

本研究では、現生のホヤの1種カタユレイボヤにおいて、セルロース合成酵素遺伝子が発現する仕組みを解明しました。セルロース合成酵素遺伝子は表皮で発現します。この表皮での発現が、AP-2という転写因子(注1)により制御されていることが分かりました。AP-2は脊椎動物にもある、表皮の形成に重要な転写因子です。またAP-2は、塩基グアニン(G)とシトシン(C)に富んだDNAに結合して遺伝子発現を活性化しますが、放線菌もまた、GCに富んだゲノム配列を持つことが知られています。つまり、セルロース合成酵素遺伝子が放線菌からホヤの祖先に移動したとき、その塩基配列がGCに富んでいたためにAP-2との結合が可能となり、表皮で発現するように進化したと推測されます。

* 本研究成果は、イギリスの科学雑誌「Proceedings of the Royal Society B(英国王立協会紀要)」に、英国時間の2016年12月21日付で掲載されます。

研究の背景

ホヤ(図1)は、セルロースを合成し、そのセルロースで体を覆うことにより外敵から身を守っています。セルロースは主に植物や細菌などの細胞壁の主要構成物質で、紙の原材料として我々の生活にもなじみの深い丈夫な高分子化合物です。しかしながら、動物は基本的にセルロースを合成する能力を持っていないことから、ホヤのグループは

きわめて珍しい特徴を持っているといえます。このためホヤのグループがセルロース合成能力を獲得した進化の仕組みを解明することが科学的に重要なテーマとなっていました。

セルロースは、セルロース合成酵素という酵素により作られます。植物や細菌はこの酵素の遺伝子をゲノムの中に持ちますが、動物はセルロース合成酵素遺伝子を持っていません。ところが、ホヤの1種のカタクレイボヤのゲノム解読などから、ホヤがセルロース合成酵素遺伝子をゲノム中に持つこと、またこのセルロース合成酵素遺伝子は、放線菌と呼ばれる細菌の1グループのものに近いことが分かってきました。つまり、ホヤの祖先は、放線菌からセルロース合成酵素遺伝子を獲得することによりセルロースを合成できるようになったと考えられています。このように、他の生物から遺伝子を獲得する現象は「遺伝子の水平伝搬」と呼ばれ、生物の進化の要因の1つとされています(図2)。

ただし、水平伝搬による生物の進化には、解き明かすべき難題があります。遺伝子が機能するためには、mRNAに転写される(これを発現といいます)必要があります。ところが遺伝子を発現させる仕組みは生物ごとに異なるため、ある生物から遺伝子をもらったとしても、その遺伝子が発現することは通常あり得ません(注2)。このことは特に、生物の系統が離れているほど顕著です。細菌とホヤの系統は大きく離れています。細菌は単細胞の原核生物ですし、ホヤは真核生物であり、また多細胞の動物です。ホヤの遺伝子の多くは、体全体ではなく必要な組織で発現して機能します。ホヤのセルロース合成酵素遺伝子は、表皮で特異的に発現しています。そのような組織構造は細菌にはありません。このように両者は大きく離れているので、細菌からセルロース合成酵素遺伝子をもらったとしても、普通に考えれば発現することがなく、発現しない遺伝子は基本的に役に立たないので、いずれ消失してしまうと考えられています。放線菌から獲得されたセルロース合成酵素遺伝子が、ホヤの表皮で発現するようになったプロセスは解明されていませんでした。

研究内容と成果

本研究では、まず現在のホヤが持っているセルロース合成酵素遺伝子がどのような仕組みにより表皮で特異的に発現するのかを調べました。その結果、ホヤのセルロース合成酵素遺伝子は、AP-2 というたった1つの転写因子の働きにより表皮で発現することが分かりました(図3)。

AP-2 はホヤやその近縁の脊椎動物(注3)において、表皮の形成に重要な役割を果たす転写因子として知られています。つまりホヤの祖先は、セルロース合成酵素遺伝子を獲得する前から、AP-2 を持っていたと考えられます。また AP-2 にはもう1つ特徴があり、DNA を構成する A, T, G, C という4種類の塩基のうち、GとCに富む領域に結合して遺伝子発現を活性化するという特徴があります。ホヤにセルロース合成酵素遺伝子を与えた放線菌もまた、GとCに富むゲノムを持っている細菌であることが知られています。ゲノム配列のうち、約70%がGCで構成されているほどです。つまり、ホヤの祖先がこの細菌からもらったセルロース合成酵素遺伝子は、元々GCに富むDNA配列をしていた可能性がきわめて高いことになります。そして AP-2 が GC に富む配列に結合しやすい性質から、ホヤの AP-2 は細菌のセルロース合成酵素遺伝子にすんなりと結合し、表皮での発現を活性化することができたのではないかと考えられます。

このことを裏付けるために、以下の実験をしました。まず放線菌のいくつかの種類において、セルロース合成酵素遺伝子の周辺に、AP-2 が結合できる配列があるかどうかを調べました。その結果、そのような配列をいくつか見つけることができました。続いて、放線菌のそれらの DNA 配列が、ホヤの中で実際に表皮での遺伝子発現を促進できるかどうかを調べました。その結果、バクテリアの DNA がホヤの中で表皮での遺伝子発現を活性化できること、特に AP-2 によってその働きは強くなることが分かりました(図4)。すなわち、放線菌のセルロース合成酵素遺伝子は、ホヤに水平伝搬で取り込まれる前から、表皮で発現できるポテンシャルを有していたことになります。

遺伝子を他の生物から獲得する水平伝搬では、今まで持っていなかった遺伝子を獲得することから、生物の進化を引き起こす要因の1つとされてきました。しかしながら、冒頭でも述べたように、単に遺伝子を獲得しただけではこの進化は起こりません。獲得した遺伝子が発現するようになって始めて進化できる可能性が生まれます。系統的に離れた生物間での遺伝の授受があった場合は特に、遺伝子が発現するようになるかどうかは偶然性に頼らざるを得ないと考えられていました。今回の研究は、たとえ細菌とホヤのように系統的に離れた生物間であっても、組み合わせによっては獲得した遺伝子が容易に発現し、水平伝搬を成功に導くことが可能であるという新しい説(図5)を提唱した科学的意義があります。

今後の展開

今回の研究で、ホヤがセルロース合成酵素遺伝子を発現させられるようになった仕組みが判明しました。水平伝搬は他の生物間でも見られる現象です。それらの生物においても、今回のホヤの祖先と放線菌のように、遺伝子を受け渡す生物間に水平伝搬を成功させる「相性のよさ」があったのではないかと考えられます。本研究をきっかけに、そのような観点からの研究の進展が期待されます。

また、ホヤの祖先がセルロース合成酵素遺伝子を発現させても、セルロースが直ちに作られるわけではありません。セルロース繊維の合成にはまだたくさんのステップが必要で、そのほとんどは分かっていません。ホヤにおけるセルロース合成の仕組みを今後解析することで、ホヤによるセルロース繊維の利用が進化した仕組みを解き明かす必要があります。

参考図



マボヤ



カタユウレイボヤ

図1：ホヤ。左はマボヤ、右はカタユウレイボヤ。両者とも、体の表面は被のうと呼ばれる、セルロースでできた殻で覆われている。

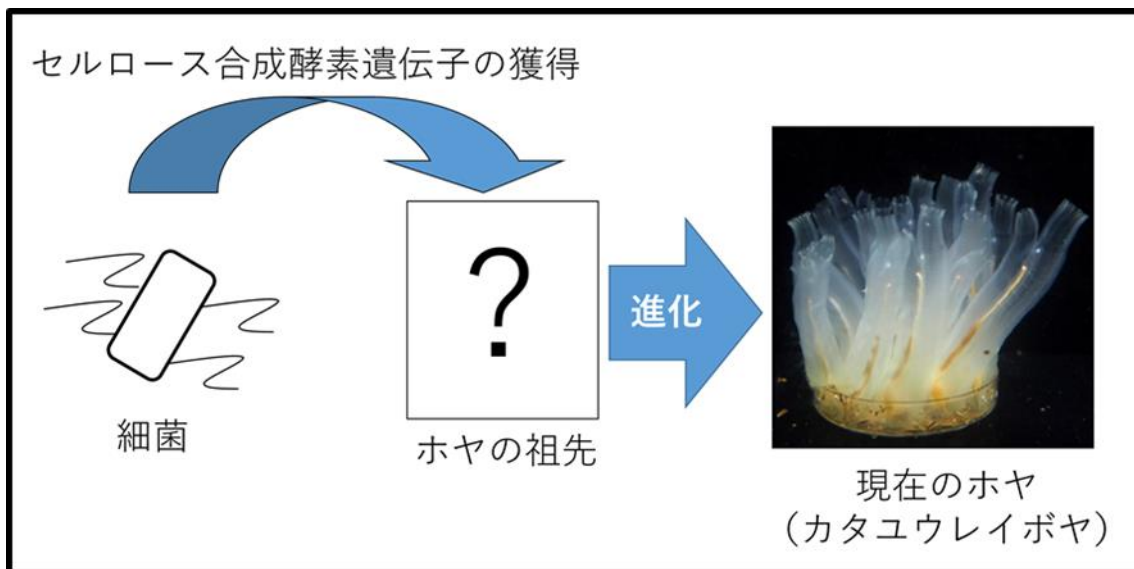


図2：ホヤにおける、水平伝搬によるセルロース合成能力の獲得

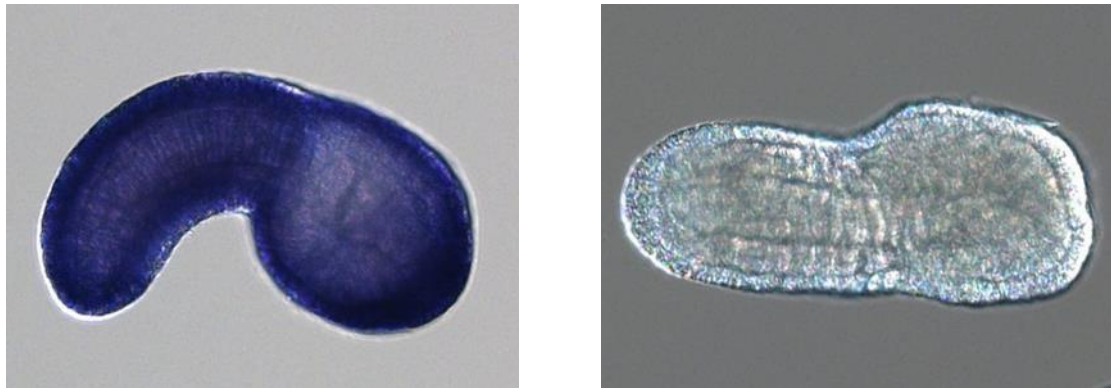


図3：左はセルロース合成酵素遺伝子の表皮での発現を青色で示している。右はAP-2の機能をなくした個体で、セルロース合成酵素遺伝子の発現が見られなくなっている。写真は発生途中の胚（尾芽胚）

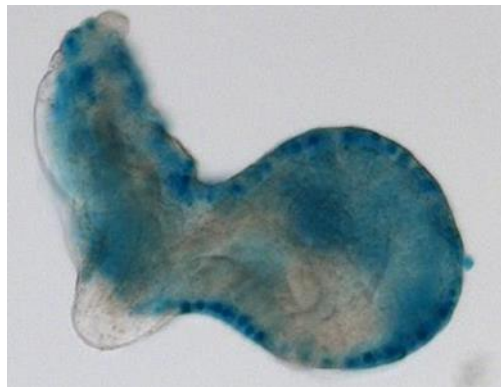


図4：放線菌のDNAが、ホヤの表皮で遺伝子を発現させている（青緑）ことがわかる。この表皮での発現には、ホヤが持つAP-2の働きも必要。

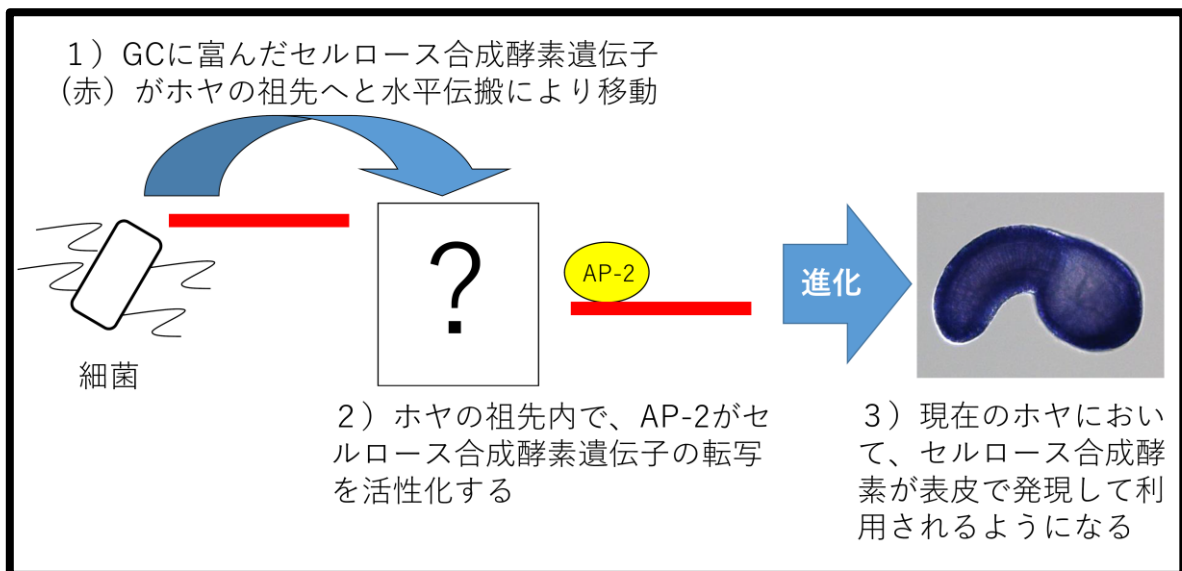


図5：ホヤにおいてセルロース合成酵素遺伝子が表皮で発現するようになるまでの流れ

用語解説

注1：DNAに結合して遺伝子の発現を調節するタンパク質。

注2：人工的に他の生物の遺伝子を発現させる場合は、遺伝子を導入する生物で発現するように適切に加工します。

注3：脊椎動物とホヤは、系統学上は同じ動物門に属し、かつ姉妹群とされています。簡単に言うと、ホヤは脊椎動物に最も近い無脊椎動物です。

掲載論文

【題名】 Transcriptional regulation of a horizontally transferred gene from bacterium to chordate
(バクテリアからホヤへと水平伝搬した遺伝子の転写調節機構)

【著者名】 笹倉靖徳、小椋陽介、Nicholas Treen、横森類、Sung-Joon Park、中井謙太、西駕秀俊、佐久間哲史、山本卓、藤原滋樹、吉田慶太

【掲載誌】 Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences
doi.org/10.1098/rspb.2016.1712

問合わせ先

筑波大学・生命環境系(下田臨海実験センター勤務)
教授 笹倉 靖徳(ささくら やすのり)