

## 発酵的水素生成能の高いマリン・ビブリオの存在意義

～カーボンニュートラルの実現に向けたマリン・バイオリソースの活用に期待～

### ポイント

- ・水素生成能の高い海洋細菌の存在意義を、ゲノム比較、網羅的遺伝子発現、細胞生理により検討。
- ・発酵的水素生成の過程で生じるギ酸の再取り込み量が、細菌の高い水素生成と有意に相関。
- ・ギ酸が、高い水素生成能を有するマリン・ビブリオの進化に寄与してきたことを示唆。

### 概要

北海道大学大学院水産科学研究所の美野さやか助教、澤辺智雄教授、インド国立科学技術研究所のラメッシュクマー博士、ブラジル・リオデジャネイロ連邦大学のトンプソン教授らの研究グループは、発酵的水素生成<sup>\*1</sup>能の高い海洋細菌であるビブリオ・トリトニウスを見だし、ゲノム比較、網羅的遺伝子発現解析、生理比較などを行い、この細菌が高い水素生成を維持し続けている理由を検討してきました。一連の研究は、発酵的水素生成に寄与するギ酸水素リアーゼ複合体（FHL）遺伝子群が、他の細菌には類を見ない、美しく整然と並んだ単一遺伝子クラスターを形成していることや、発酵的水素生成の過程で生じるギ酸の再取り込みが高い水素生成に寄与することを見いだしています。

世界各国で、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルという目標が掲げられる中、エネルギー供給源の多様化を目的とした様々な研究開発が活発に行われています。ここ四半世紀の間には、マリン・バイオリソース<sup>\*2</sup>を活用するバイオ燃料生産技術に関する取り組みも進展しています。澤辺教授らのグループも、海洋細菌を生物触媒とし、大型海藻を原料とした水素生成技術の基盤構築を進めてきました。

本研究では、マリン・ビブリオの中でも、ある特定のグループの種のみが、効率の高い水素生成能を示すことから、その理由を、ゲノム比較、網羅的遺伝子発現応答及び微生物生理実験により調べました。その結果、ポータレシエと名付けた系統のマリン・ビブリオは、発酵的水素生成を触媒する FHL 複合体の形成に必要な 20 を超える遺伝子群が、美しく整然と並んだ単一の遺伝子クラスターを形成し、かつ他とは異なるニッケルの ABC 輸送体遺伝子を有していました。また、水素生成の原料となる糖は、解糖系を通過して代謝されることにより水素生成能が向上し、その発酵生成物の一種であるギ酸の生成量と細胞への再取り込み量の高さが、水素生成能の高さと関連することを見いだしました。これに加え、分子系統解析により、マリン・ビブリオの多くは、発酵的水素生成に関与する遺伝子を失っているか、遺伝子の構造が変化していることも分かりました。マリン・ビブリオは、発酵が生じやすい海洋動物の消化管や海底堆積物などでも見いだされることから、それらの環境で生成されるギ酸を解毒し、細菌細胞内の pH 恒常性を保つために、一部の種によって、発酵的水素生成能が現在も維持されているものと考えています。このマリン・ビブリオは、発酵的水素生成のモデル細菌である大腸菌の 1.5 倍を超える水素生成効率を有し、かつ塩分が高い海水中でもその効率が維持されることから、本研究成果を活用した水素の生成基盤の開発が期待されます。

なお、本研究成果は 2025 年 3 月 25 日（火）、2024 年 6 月 19 日（水）及び 2022 年 10 月 17 日（月）に Current Microbiology 誌に公開されました。

## 【背景】

各国で、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルという目標が掲げられる中、エネルギー供給源の多様化を目的に、様々な研究開発が進展しています。ここ四半世紀の間には、マリン・バイオリソースを活用するバイオ燃料生産技術に関する取り組みも急速に進展しています。澤辺教授らのグループは、水素生成能の高い海洋細菌、ビブリオ・トリトニアスの発見を皮切りに、海洋細菌を生物触媒とし、大型海藻を原料とした水素生成技術の基盤を構築するための一連の研究を行ってきました。また、ビブリオ・トリトニアスと系統を分かち合うビブリオ・ポータレシエが、ビブリオ科の中でも、極めてよく似たゲノムを有し、高い水素生成を示すことも見いだしていました。しかしながら、特定のグループのマリン・ビブリオのみが、高い水素生成能を示す理由は明確ではありませんでした。既知のほぼ全ての水素生成ビブリオ種を集め、ゲノム比較、網羅的遺伝子発現、微生物生理学実験を行うことで、その理由を明らかにすることを目的としました。

## 【研究手法】

16種の既知の水素生成マリン・ビブリオを集め、ゲノム比較、網羅的遺伝子発現応答及び微生物生理実験を行いました。

## 【研究成果】

ポータレシエと名付けた一群のマリン・ビブリオは、発酵的水素生成を触媒するFHL複合体の形成に必要な美しく整然と並んだ単一の遺伝子クラスターを持ち、かつ他の種とは異なるニッケルのABC輸送体遺伝子を有していました(図1)。また、水素生成の材料となる糖は解糖系を通過することにより水素生成能が向上し(図2)、その発酵生成物の一種であるギ酸の生成量と細胞への再取り込み量の高さが、高い水素生成と関連することを見いだしました(図3)。一方、分子系統解析により、マリン・ビブリオの多くは、発酵的水素生成に関与する遺伝子を失っているか、関連する遺伝子クラスターの構造が変化していることも分かりました(図4)。マリン・ビブリオの特定の種は、発酵が起きやすい海洋環境で良く見いだされることから、ギ酸の解毒として、一部の種が発酵的水素生成能を、現在も維持しているものと考えています。

## 【今後への期待】

ポータレシエのグループのマリン・ビブリオが、高い水素生成能を示す理由の一端が明らかになってきました。しかしながら、技術的な困難さから、細胞レベルでの発酵的水素生成効率の比較が行えていません。また、FHLの精製も困難な状況にあり、そのバイオケミストリーや構造決定はなされていません。これらを克服しながら、分子レベルでの研究を進める必要があります。

また、これらのマリン・ビブリオは、発酵的水素生成のモデル細菌である大腸菌の1.5倍を超える水素生成効率を有し、かつ塩分が高い海水中でもその効率が維持されることから、本研究成果を活用したバイオ水素の生成基盤の開発が期待されます。

## 【謝辞】

本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費補助金(JP16H04976及びJP19H03041)、日伯二国間交流事業(JPJSBP120200101)及び奨学寄附金(グッドフィールド株式会社)の支援を受け、実施されました。

## 論文情報

論文名	Unexpected diversity in gene clusters encoding formate hydrogenlyase complex machinery in <i>Vibrionaceae</i> correlated to fermentative hydrogen production (マリン・ビブリオが有するギ酸水素リアーゼ複合体遺伝子の予想を超えた多様性と発酵的水素生成との関連)
著者名	澤辺智雄 <sup>1*</sup> 、梅木結人 <sup>2 (研究当時)</sup> 、Ramesh Kumar Natarajan <sup>3</sup> 、Chunqi Jiang <sup>2, 4</sup> 、Fabiano Thompson <sup>5</sup> 、美野さやか <sup>1</sup> (1北海道大学大学院水産科学研究院、2北海道大学大学院水産科学院、3インド国立科学技術研究所、4東京大学大気海洋研究所、5ブラジル・リオデジャネイロ連邦大学) *筆頭著者
雑誌名	Current Microbiology (微生物学の専門誌)
D O I	10.1007/s00284-025-04176-3
公表日	2025年3月25日(火)(オンライン公開)
論文名	Core transcriptome of hydrogen producing marine vibrios reveals contribution of glycolysis in their efficient hydrogen production (コア・トランスクリプトームにより明らかになってきた効率的な発酵的水素生成への解糖系の寄与)
著者名	佐藤吉裕 <sup>1 (研究当時)</sup> 、美野さやか <sup>2</sup> 、Fabiano Thompson <sup>3</sup> 、澤辺智雄 <sup>1*</sup> (1北海道大学大学院水産科学院、2北海道大学大学院水産科学研究院、3リオデジャネイロ連邦大学) *筆頭著者
雑誌名	Current Microbiology (微生物学の専門誌)
D O I	10.1007/s00284-024-03764-z
公表日	2024年6月19日(水)(オンライン公開)
論文名	Comparative physiology and genomics of hydrogen-producing vibrios (水素生成ビブリオの比較生理とゲノミクス)
著者名	松村佑太 <sup>1 (研究当時)</sup> 、佐藤一道 <sup>1 (研究当時)</sup> 、Chunqi Jiang <sup>1 (研究当時)</sup> 、美野さやか <sup>2</sup> 、澤辺智雄 <sup>2*</sup> (1北海道大学大学院水産科学院、2北海道大学大学院水産科学研究院) *筆頭著者
雑誌名	Current Microbiology (微生物学の専門誌)
D O I	10.1007/s00284-022-03065-3
公表日	2022年10月17日(月)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学大学院水産科学研究院 教授 澤辺智雄 (さわべともお)

T E L 0138-40-5569 メール sawabe@fish.hokudai.ac.jp

U R L <https://www2.fish.hokudai.ac.jp/faculty-member/sawabe-tomoo/>

<https://researchers.general.hokudai.ac.jp/profile/ja.24b04e78bac629fd520e17560c007669.html>

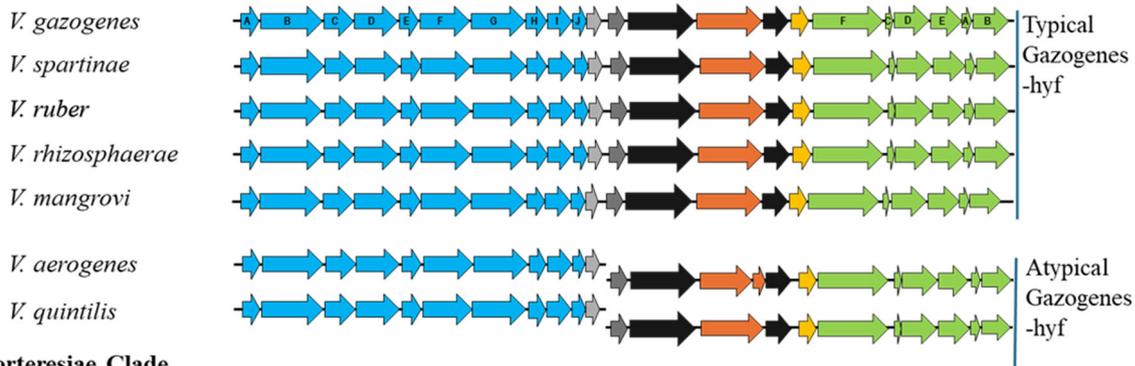
## 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

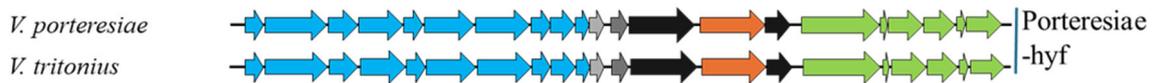
T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

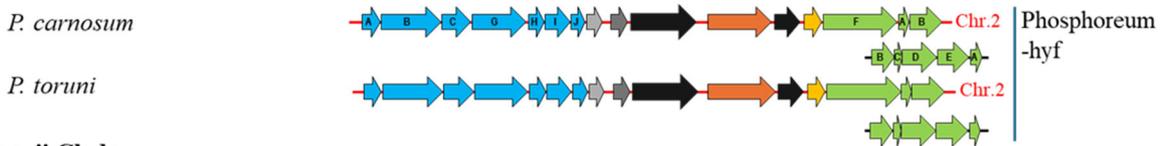
Gazogenes Clade



Porteresiae Clade



Phosphoreum Clade



Jeanii Clade

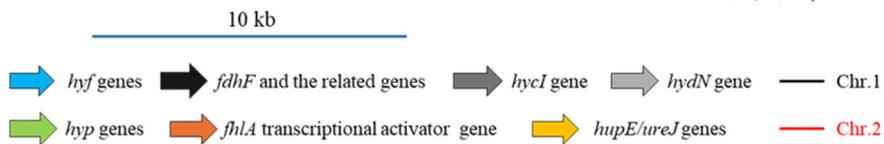
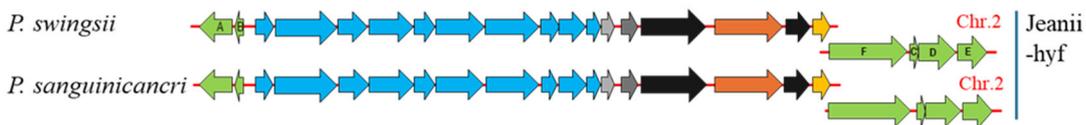


図 1. マリン・ビブリオの FHL 遺伝子クラスターの多様性。

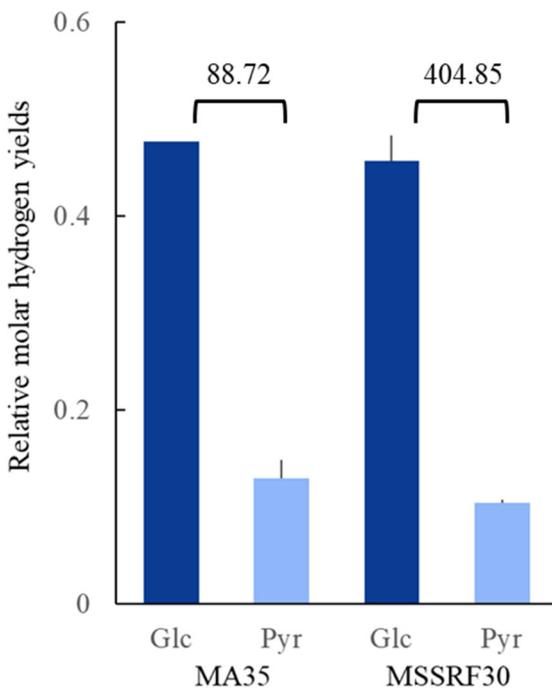


図 2. 解糖系を通過する原料を代謝した場合のマリン・ビブリオによる水素生成能の差異。バーの上の数値はベイズファクター。

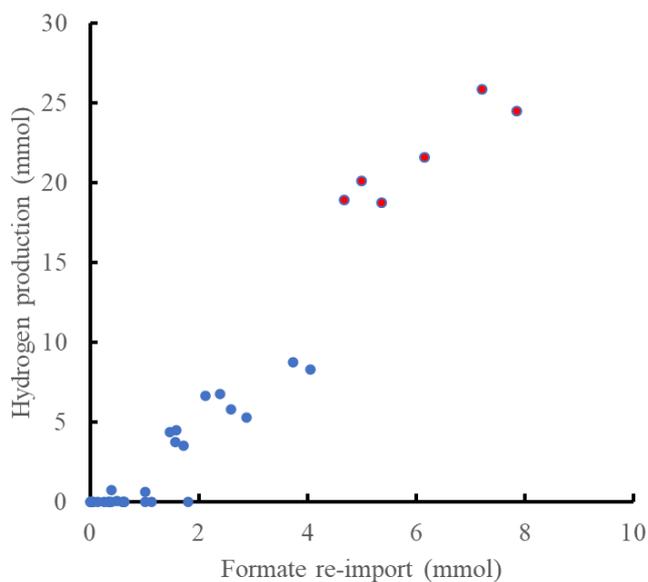


図 3. ギ酸の再取り込みと水素生成の相関。赤丸が、ポーテレスイエの系統に属する細菌種。

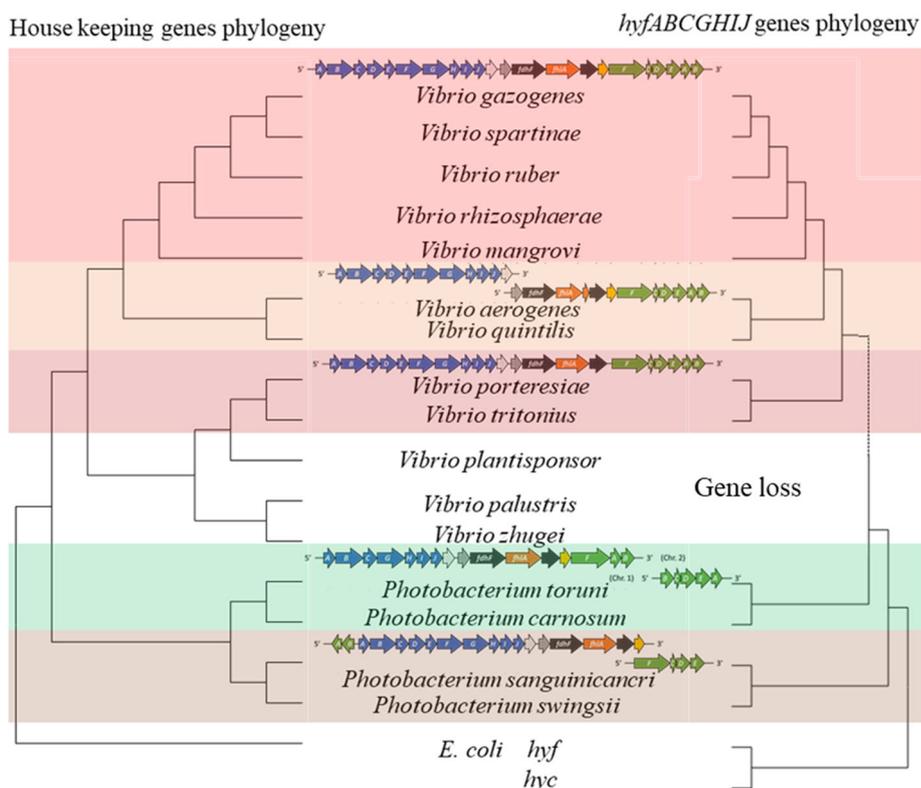


図 4. 水素生成マリン・ビブリオの進化仮説を示す分子系統樹。

**【用語解説】**

- \*1 発酵的水素生成 … 糖質を原料として嫌気的な条件で生じる水素生成。
- \*2 マリン・バイオリソース … 海洋由来の生物資源。