

# 深海熱水噴出域の生態学：幼生の海洋表層分散

## Ecology of deep-sea hydrothermal vents — Larval dispersal in surface waters

東京大学大気海洋研究所 矢萩 拓也 (Yahagi, Takuya)

### はじめに

熱水噴出域は、1977年に東太平洋のガラバゴス諸島沖、水深約2,500 m で発見されました。その後、海底の拡大によって形成される海嶺や、プレートの沈み込みに伴って生じる背弧海盆や火山帯において、500か所以上の熱水噴出域が見つかっています。これまでの記録で最も深い熱水噴出域は、カリブ海の4,960 m に位置しています。

これらの熱水噴出域には、巻貝や二枚貝、エビ・カニなどの甲殻類、チューブワームやウロコムシといったゴカイ類など、多様な無脊椎動物が高密度で生息しています(図1)。太陽光が届かない熱水噴出域の生物は、化学エネルギーを利用して有機物を合成する細菌を基盤とした化学合成生態系を築いており、これまでに640種以上の固有動物が報告されています。浅海に一般的な分類群に属する種も僅かながら知られており、例えば、ウミウシ類では、裸鰓目スギノハウミウシ属の一種が大西洋の熱水噴出域(1,645 m) から報告されています(Valdés & Bouchet, 1998)。

熱水噴出域は海底に点在しており、熱水活動の規模や持続性も様々で不安定な環境といえます。しかし、大西洋、北西太平洋、南太平洋、東太平洋、インド洋といった各海域内では驚くほど類似した生物群集が形成されています。これは、多くの無脊椎動物が成体になると海底で生活する一方、卵や幼生の段階では海中を浮遊し、熱水噴出域間を移動するためです。このような幼生の地理的分散が、熱水噴出域動物の分布を広げ、その進化史を形作ってきました。しかし、多くの分類群で体長が1 mm 以下の微小な幼生が、いつ、どこで、どのように浮遊分散しているのかは、未解明な点が多く残されています。

### 幼生の栄養生態と分散水深

熱水噴出域動物の幼生は、その栄養獲得様式に基づき、卵黄に蓄えられた栄養のみで成長する「卵黄栄養発生」と、海中のプランクトンを摂食して成長する「プランクトン食発生」に大別することができます。これらの栄養獲得様式は、幼生が分散する水深と密接に関連している可能性があります。例えば、卵黄栄養発生を示すゴカイ類では、発生や成長に深海特有の高い



図1 沖縄トラフ南奄西海丘(水深700 m)の熱水噴出域生物群集。ゴエモンコシオリエビ *Shinkaia crosnieri* やミジラオハラエビ *Alvinocaris dissimilis* などの節足動物や、シンカイヒバリガイ属 *Bathymodiolus* やキノミフネカサガイ属 *Lepetodrilus* の軟体動物が生息。海洋調査船「なつしま」NT11-20次航海、無人探査機「ハイバードルフィン」潜航にて撮影(2011年9月30日; HPD#1327)。

圧力が必要であり、幼生は卵黄の栄養に支えられながら海底近くを移動すると考えられています。一方、プランクトン食発生を示すエビ類やカニ類の幼生については、海底から中深層にかけて鉛直遊泳し、摂餌しながら広い範囲に分散する種が報告されています(矢萩ら, 2019)。

しかし、中深層よりさらに浅部の太陽光が届く表層域における幼生の採集例はなく、熱水噴出域由来の幼生が、植物プランクトンなど餌の豊富な有光層(0-200 m)で成長し、流れの速い表層流によって熱水噴出域間を移動しているかについては未解明のままです。そこで私は、海洋表層における熱水噴出域動物幼生の分散の有無、ならびに光合成生態系と化学合成生態系の繋がりを明らかにすることを目的として、貝類や甲殻類を材料に研究を進めてきました。

## 調査航海での生物採集

熱水噴出域動物の研究は、学術調査船を用いた現場観測から始まります(図2)。調査航海では、多くの場合、1週間から1か月程度を洋上で過ごします。私はこれまでに、北西太平洋、インド洋、カリブ海における熱水噴出域調査を含む、計22度の航海に参加し、環境測定や生物採集を行ってきました。

深海平原や海溝における網羅的な生物調査では底引き網が用いられることが多い一方、熱水噴出域では、限られた範囲での精密な観測と採集が必要となるため、無人探査機や有人潜水調査船が用いられます。無人探査機の海中調査が始まると、搭載されたカメラの映像を船上でリアルタイムに確認することができ、研究者間で相談しながら観測を進めていきます。



図2 海洋調査船「なつしま」(1981年竣工, 2016年退役)。有人潜水調査船「しんかい2000」や無人探査機「ハイパードルフィン」の母船として活躍。撮影: 矢萩拓也



図3 熱水噴出域生物の採集: 無人探査機のスラップガン(左上)を用いてエンセイオハラエビ *Rimicaris leurokolos* を吸引。海洋調査船「なつしま」NT13-22次航海, 無人探査機「ハイパードルフィン」潜航にて撮影(2013年11月14日; HPD#1593)。

生物採集には、主にスラップガンと呼ばれる吸引式の装置が用いられます(図3)、映像を頼りに遠隔操作で目的の生物を採取する作業は容易ではありませんが、調査は船員および探査機運航チームの高い技術によって支えられています。

### 熱水噴出域動物幼生の表層分散

晴れて生物を採集した後は、飼育や遺伝子解析などの室内実験へと研究を進めます。深海動物は、採集後に急激な水温や水圧の変化を受けることで死亡してしまい、飼育研究が困難とされています。しかし、浅海と同程度の水温に生息する熱水噴出域の一部の種では、急激な圧力変化を避けて慎重に船上へ揚収することで、生存個体を得られる場合があります。また、岩石や堆積物、体表に付着する卵も併せて採集できることがあります。

伊豆・小笠原および沖縄海域の熱水噴出域(442-1,227 m)に生息する腹足類ミョウジンシンカイフネアマガイでは、大気圧条件下においても卵の発生が進行し、採集後40-56日で孵化幼生を得ることができ、180日間にわたる幼生飼育に成功しました(図4)。複数の卵カプセルから孵化した90個体の幼生について、水温5°-30°Cの異なる条件下で植物プランクトンを給餌し、成長と生残に対する水温と餌利用の影響を評価しました。微生物培養プレートを用いて幼生を1個体ずつ独立に飼育し、海水交換、給餌、行動記録を1日おきに行った結果、プランクトン食幼生の表層分散を示唆する多くの知見が得られました。

- 1) 幼生は、約16.6-44.2 mm/min の速度で継続的な鉛直遊泳を行い、生息水深から表層まで約4-43日で到達し得ること
- 2) 遊泳において、正の光走性は示さず、負の重力走性が働いている可能性が高いこと
- 3) 有光層で優占する植物プランクトン(珪藻)を摂食して成長すること
- 4) 表層水温にあたる25°Cかつ給餌条件下で、最も高い成長率と生残率を示すこと
- 5) 孵化時の殻長140-160 μm から、半年間で280 μm 程度まで成長し、遊泳器官(面盤)と眼点が発達していくこと(図4B)
- 6) 本種の着底変態サイズ(720 μm)に達するまでの浮遊期間は1年以上と推定されること

- 7) 成体の生息水温(5°-15°C)では、給餌の有無に関わらず成長が乏しく、死亡率が高いこと
- 8) 無給餌条件であっても、低水温(5°-10°C)では110日以上生残し、植物プランクトンが乏しい深海から、餌が豊富な表層へ移動するまでの飢餓に耐えうること

さらに、広い地理的分布域における遺伝的交流の程度を明らかにするため、ミトコンドリアDNAを用いた成体の集団解析を行いました。その結果、約1,300 km離れた熱水噴出域間においても遺伝的交流が認められ、本種が表層海流によって伊豆・小笠原海域と沖縄海域の間を移動している可能性が示されました。本研究は、熱水噴出域動物において表層分散を実証的に示した初めての例であり、光合成生態系と化学合成生態系を繋ぐ物質循環の理解に新たな視点を提供するものとなります(Yahagi et al., 2017)。

その後、南太平洋および大西洋に分布するシンカイフネアマガイ類2種、および北西太平洋のオハラエビ類3種についても同様の集団解析を行い、いずれの熱水噴出域固有種においても広範な分布域内で遺伝的交流が認められました(Yahagi et al., 2015; 2019; 2020)。これらの種はいずれもプランクトン食発生を示すため、幼生による表層への鉛直移動と広域分散が関連している可能性があります。

一方で、北極域および南極域の熱水噴出域に生息する生物群集は、主に卵黄栄養発生種によって構成されています。極域では表層水温が低く、プランクトン食幼生が表層へ鉛直移動して成長するには不適な環境である可能性が高く、こうした環境条件が極域への分布拡大を制限していることが示唆されます。これらの結果は、表層水温が熱水噴出域の動物相形成に重要な役割を果たしている可能性を示しています。

### これからの研究課題

熱水噴出域動物において、プランクトン食幼生の鉛直移動および表層分散が、どの程度一般的な現象であるのかについては依然として未解明です。そこで現在、既に熱水噴出域へ着底した貝類が、幼生期にどのような水塊環境を経験してきたのかを、付加成長する貝殻を用いて復元する手法の開発に取り組んでいます。また、プランクトンネットで採集した幼生を遺伝子配列に基づいて網羅的に解析するDNAメタバーコーディング手法を用い、海洋表層における熱水噴出域由来幼生の探索も進めています。

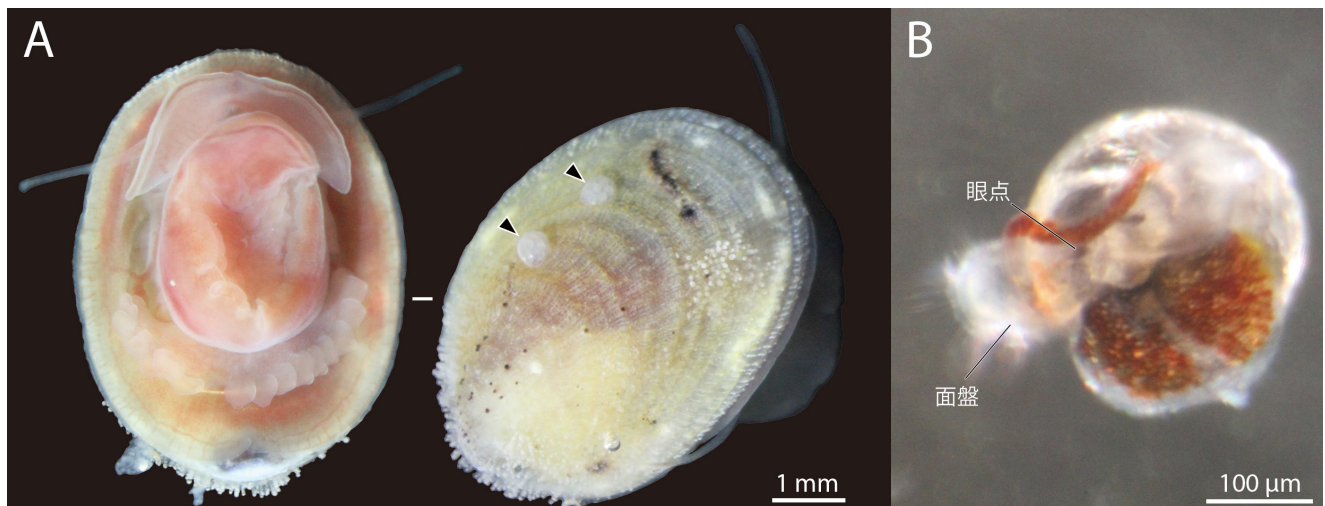


図4 ミョウジンシンカイフネアマガイ *Shinkailepas myojinensis* の成体(A)と給餌幼生(25°C, 112日齢)(B)。成体は熱水噴出域の貧酸素環境に適応的な赤血球をもつ。矢じり: 同種別個体の卵カプセル(10個体前後の胚を含む)。撮影: 矢萩拓也

さらに、幼生が表層で成長した後、どのようにして深海の熱水噴出域へ戻るのかという点も極めて興味深い研究課題です。着底を誘導する要因として、熱水噴出域由来の化学成分、水温勾配、振動、微生物群集、あるいは同種成体から放出される着底誘因物質など、複数の可能性が考えられます。加えて、幼生の感覚器官や走性といった生理学的側面も着底機構を理解する上で手がかりになるかもしれません。

近年、熱水噴出域に生息する二枚貝や甲殻類において、潮汐と関連した体内時計の存在が示されつつあります。私の共同研究では、エンセイオハラエビの成体(図3)について採集後72時間にわたる遺伝子発現リズムを解析した結果、その周期が約12時間であることが明らかとなりました(Zhang et al., 2025)。これは月の引力に伴う水圧変化が、深海熱水噴出域動物の体内時計に影響を与えている可能性を示唆する興味深い結果です。また、同解析では陸上生物における概日リズム関連遺伝子と相同な遺伝子も認められました。これら相同遺伝子は周期的な発現を示さなかったものの、同種のプランクトン食幼生が海洋表層で分散するのであれば機能的な役割を果たしている可能性があります。

今後は、深海熱水噴出域と共に、海溝や深海平原に生息する無脊椎動物についても、幼生期における鉛直移動の有無を比較評価することで、深海と海洋表層を結ぶ生物学的過程をより包括的に理解することを目指しています。学術調査船を用いた長期的かつ横断的な研究を通じて、海洋表層水温や海流、さらには潮汐・水圧といった物理環境要因が、深海動物の分布や進化にどのような影響を及ぼしてきたのかについて、新たな知見が得られることを期待し、その解明に取り組んでいます。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費15J08646, 18J01945, 19K15893および22K14934の助成を受けたものです。調査航海乗組員および共同研究者の皆様、ならびに本稿執筆の機会を与えてくださった公益財団法人水産無脊椎動物研究所の片山英里氏に感謝申し上げます。また、調査画像の利用について国立研究開発法人海洋研究開発機構広報課のご協力をいただきました。

## 引用文献

- Valdés Á. and Bouchet P. (1998) Naked in toxic fluids: A nudibranch mollusc from hydrothermal vents. *Deep-Sea Res. II: Top. Stud. Oceanogr.* 45: 319-327.
- Yahagi T., Watanabe H., Ishibashi J. and Kojima S. (2015) Genetic population structure of four hydrothermal vent shrimp species (Alvinocarididae) in the Okinawa Trough, Northwest Pacific. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 529: 159-169.
- Yahagi T., Kayama-Watanabe H., Kojima S. and Kano Y. (2017) Do larvae from deep-sea hydrothermal vents disperse in surface waters? *Ecology* 98: 1524-1534.
- Yahagi T., Fukumori H., Warén A. and Kano Y. (2019) Population connectivity of hydrothermal-vent limpets along the northern Mid-Atlantic Ridge (Gastropoda: Neritimorpha: Phenacolepadidae). *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 99: 179-185.
- Yahagi T., Thaler A.D., Van Dover C.L. and Kano Y. (2020) Population connectivity of the hydrothermal-vent limpet *Shinkailepas tollmanni* in the Southwest Pacific (Gastropoda: Neritimorpha: Phenacolepadidae). *PLoS ONE* 15: e0239784.
- Zang H., Yahagi T., Miyamoto N., Chen C., Jiang Q., Qian P.-Y. and Sun J. (2025) Circatidal control of gene expression in the deep-sea hot vent shrimp *Rimicaris leurokolos*. *Proc. R. Soc. B.* 292: 20242970.
- 矢萩拓也, CHEN Chong, 川口慎介 (2019) 深海の化学合成生態系動物群集の幼生分散過程. *海の研究*, 28: 97-125.