

## 地震生命圏の提案 Earthquake Biosphere

川口 慎介<sup>1\*</sup>

KAWAGUCCI, Shinsuke<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>JAMSTEC

「化学合成生態系の進化」を考えるには「化学合成生態系」というモノを理解しなければならないだろう。一般に「化学合成生態系」は「光合成生態系」に対応して位置づけられているように思う。つまり、生態系を理解するためには「一次生産者が光合成生物か化学合成生物か」で分類することが有効な手段である、という発想だ。たしかにこの分類法を採用すれば、世の中に数多ある生態系をすべてどちらかに分類可能である。しかし、何か違和感のようなものが残る。

そもそも「光合成生物」と「化学合成生物」とは、対称的に捉えることができる性質のものなのだろうか。光合成生物の代謝機能は「光エネルギーの高エネルギー物質への固定」「高エネルギー物質を利用したATPの産生」「ATPを利用した無機炭素からの有機物産合成」の3つに分けられるだろう。一方の化学合成生物の代謝はどうだろうか。光合成生物の持つ3つの代謝機能のうち、後ろ2つは化学合成生物の代謝にも組み込まれているが、初めの機能については備わっていない。化学合成生物は、自らエネルギーを物質に固定するかわりに、外部に存在する高エネルギー物質（水素ガスやメタンなど）を取り込む方法を採用している。（むしろ光合成生物がこの機能を代謝として身につけたのでは、という部分も考えたいが、本題から外れるのでここでは深入りしない）

整理しよう。生態系を理解するには、その基礎となる部分を理解することが重要である。重要なのだが、その時に「一次生産者」という枠組みで「光合成生物/化学合成生物」という生物分類を採用してしまうと、両者の持つ代謝機能が非対称であるがゆえに、生態系の構造をうまく描写できない気がする。だから「一次生産者」を「機能」に分割して考える必要がある。まず光合成生物にも化学合成生物にも共通する「高エネルギー物質を利用してATPを経由して無機炭素から有機物を合成する」という機能を「狭義の一次生産」と捉える。その上で「狭義の一次生産に利用する高エネルギー物質の起源」を考える。これを「ゼロ次生産過程」と名付けよう。そして「ゼロ次生産過程」と「生態系」を合わせた概念を「生命圏」と呼ぶことにして、あらためて「ゼロ次生産過程」で「生命圏」を分類し、ゼロ次生産過程を頭につけて「生命圏」と名付ける。

光合成生態系のゼロ次生産過程は、先に述べたとおり光合成生物の代謝機能に含まれているので、すべて「光合成生命圏」と呼ぶことができる。一方の化学合成生態系はどうだろうか。海底熱水噴出口周辺には化学合成生態系が発達しているが、一次生産に利用する水素ガスや硫化水素は（ほとんどが）地球内部エネルギーによる熱水反応に由来するので、ゼロ次生産過程は熱水活動であり「熱水生命圏」と分類できるだろう。しかしながら、たとえば沖縄トラフの熱水に含まれるメタンの大部分は光合成生命圏産物である海底堆積物に由来するので、このメタンを利用する化学合成生態系は「光合成生命圏」に分類されてしまう。冷湧水周辺の化学合成生態系については、ゼロ次生産過程どころか水自体の起源が不明なものも多いため、どの生命圏に属するのか判断が難しいが、堆積有機物に由来するメタンを利用している光合成生命圏が多いと推測される。

こうして考えると、現在の地球上でわれわれが認識している生態系には「非・光合成生命圏」に分類されるものがほとんど存在しないことがわかる。「非・光合成生命圏」は「光合成生命圏」が存在しない世界における生命圏の在り方であるから、始原地球環境や他天体における生命活動を考える上でとても重要である。なにより「化学合成生態系の進化」を考えるのなら、現在の地球上で「非・光合成生命圏」の多様性を発見し調査することが重要である。にもかかわらず、深海や高山、砂漠、極域などのいわゆる極限環境でも「非・光合成生命圏」はほとんど見つからない。もちろん地球上のあらゆる環境をしらみつぶしに調査していけば、新奇な生態系を発見することができるかもしれないし、それが「非・光合成生命圏」であるかもしれない。しかし、未知の深海熱水噴出口を1つ探すだけでヒーヒー言っている現状を鑑みるに、そんな調査は現実的ではないだろう。

いよいよ本講演の主題である。生態系研究では、まず新たな生態系を発見して、それを調査することで生態系の正体を暴くという手順だが、生命圏研究は違う。生命圏研究では、まずゼロ次生産過程を仮定し「生物利用可能エネルギーがあるんだから生態系が存在するだろうよ」と考え調査を進めるのだ。ということで、ここに「地震生命圏」を提案するのである。

キーワード: 地震生命圏, 化学合成生態系, 光合成, 地震, 生命圏

Keywords: Earthquake Biosphere

## 東北地方太平洋沖地震後の深海生態系

### Impact by the mega-earthquake: the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, on deep-sea ecosystems in Japan Trench

藤倉 克則<sup>1\*</sup>, 渡部裕美<sup>1</sup>, 宮本教生<sup>1</sup>, 古島靖夫<sup>1</sup>, 野牧秀隆<sup>1</sup>, 高井研<sup>1</sup>, 北里洋<sup>1</sup>, 辻健<sup>2</sup>, 新井和乃<sup>3</sup>, 乗船研究者<sup>1</sup>

FUJIKURA, Katsunori<sup>1\*</sup>, Hiromi WATANABE<sup>1</sup>, Norio MIYAMOTO<sup>1</sup>, Yasuo FURUSHIMA<sup>1</sup>, Hidetaka NOMAKI<sup>1</sup>, Ken TAKAI<sup>1</sup>, Hiroshi KITAZATO<sup>1</sup>, Takeshi TSUJI<sup>2</sup>, Kazuno ARAI<sup>3</sup>, Onboard Party<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構, <sup>2</sup> 京都大学, <sup>3</sup> 千葉大学

<sup>1</sup>JAMSTEC, <sup>2</sup>Kyoto University, <sup>3</sup>Chiba University

The tremendous March 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.0) ruptured a wide area along the plate interface off the Pacific coast of Tohoku, Japan. The tsunami induced by earthquake was extremely huge. Earthquake, after shocks and tsunami have been variously affected to not only coastal marine ecosystems but also deep-sea ecosystems. Expected impacts to deep-sea ecosystems were following:

- 1) The extinction of deep-sea organisms by turbidity currents,
- 2) The extinction and/or new occurrences of chemosynthesis-based ecosystems by chemicals such as CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>, discharge from seafloor,
- 3) Change of faunal composition and distribution patterns of deep-sea organisms by numerous suspended matters.

To estimate and make clear for above expected impacts by the earthquake, we conducted deep-sea investigations using the HOV Shinkai 6500 and Deep-towing TV Camera systems in the Japan Trench from June to August, 2011. Several fissures on the seafloor, new occurrences of bacterial mats associated with CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S seepages, other bacterial mats associated with decay of dead benthic organisms aggregations, decreasing of *Calyptogena phaseoliformis* colonies and new occurrences of single species holothurian dense aggregations were observed. These phenomena have never found before the March 2011 Tohoku earthquake. So far, we have investigated using some deep-sea research gears. So, we believe, to describe these impacts by the huge earthquake is our important task.

キーワード: 東北地方太平洋沖地震, 深海生態系, バクテリアマット, 日本海溝

Keywords: the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, deep-sea ecosystems, bacterial mat, Japan Trench

## 成長線と安定同位体比解析に基づく化学合成二枚貝ツキガイモドキの成長パターン Growth pattern of the chemosynthetic bivalve *Lucinoma annulatum* based on growthline and isotopic analysis

中島 礼<sup>1</sup>, 佐藤 瑞穂<sup>2</sup>, 坂井 三郎<sup>3</sup>, 間嶋 隆一<sup>2\*</sup>

NAKASHIMA, Rei<sup>1</sup>, Mizuho Sato<sup>2</sup>, SAKAI, Saburo<sup>3</sup>, MAJIMA, Ryuichi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所, <sup>2</sup> 横浜国立大学, <sup>3</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup> Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup> Yokohama National University, <sup>3</sup> JAMSTEC

ツキガイ科 (Lucinidae) に属する二枚貝は、ほぼすべての種において鰓に硫黄酸化細菌を共生させているとされ、化学合成群集の特徴種として知られる。東南アジアでは食用とされたり、化石としても多産するが、ツキガイ類の詳しい成長過程については明らかになっておらず、環境の変動や個体の生理状態が貝殻の成長にどのように反映されるのかも明らかではない。そこで本研究では、別府湾で採取されたツキガイ科の一種であるツキガイモドキ (*Lucinoma annulatum* (Reeve)) を用いて、貝殻の成長線などの貝殻構造の解析と、酸素・炭素安定同位体比の解析から、その成長過程や生息環境について検討した。

2005年11月19日、大分県別府湾の水深約50mの地点で採取されたツキガイモドキを使用した。82個体の殻高、殻長、殻幅を計測し、ヒストグラムを作成した。そのうち5個体について成長線などの貝殻構造の観察を行った。観察には、貝殻を正中線に沿って切断し、切断面のレプリカフィルムを作成し、それを使用した。ツキガイモドキの貝殻断面には外表面から、外層・中層・筋痕層・内層の4層が見られ、成長線解析には、成長線が最も明瞭な中層部分における成長線間隔を計測した。また、貝殻断面の外表面に見られる凸状の板状輪肋と凹状の成長障害輪の位置を記録した。酸素・炭素安定同位体比測定は、貝殻断面の中層部分を成長線に平行に約80-500um間隔で切削して得た粉末サンプルを使用した。貝殻切削には高精度マイクロミルシステム GeoMill326を用い、微小粉体回収装置吸引吸引で回収した。

殻高、殻長、殻幅のヒストグラムから、3つのピークが認められた。これらのピークより、この個体群は繁殖時期の異なる個体を含むことが推測され、それぞれのピーク間隔は繁殖間隔の貝殻成長量を示すと考えられる。

成長線解析と輪肋、障害輪の分布から、ツキガイモドキの貝殻成長は前期、中期、後期の3つのステージに分けられることがわかった。前期は殻頂部周辺に相当し、輪肋・成長線ともに間隔が狭く障害輪が入らない。中期は貝殻中央部に相当し、輪肋・成長線ともに間隔が広く、障害輪が存在する。後期は腹縁部に相当し、成長線間隔が中期より大幅に狭くなり、障害輪が多く挟在する。中期と後期の境界の位置はどの個体でもほぼ同じであり、その位置は殻高ヒストグラムの最初のピークにほぼ一致する。そのため、この位置はツキガイモドキの貝殻成長の一種の変換点に相当すると推定される。

酸素・炭素安定同位体比の分析結果より、7つのサイクルが認められた。その変動幅を海水温に換算すると、15℃?20℃となり、実際の別府湾の水深50mの水温11℃?24℃よりは変動が小さいが調和的といえる。また、高水温時と低水温時に貝殻成長が停止していることが考えられる。

キーワード: 成長線, 成長サイクル, 化学合成群集, 二枚貝, 安定同位体

Keywords: growthline, growth pattern, chemosynthetic community, bivalve, stable isotope

## 沖縄トラフと伊豆・小笠原諸島海域に分布するオハラエビ類の遺伝的集団構造 Genetic Population Structure of Alvinocaridid Shrimps in the Okinawa Trough and the Izu-Ogasawara Arc

矢萩 拓也<sup>1\*</sup>, 渡部 裕美<sup>2</sup>, 小島 茂明<sup>1</sup>

YAHAGI, Takuya<sup>1\*</sup>, WATANABE, Hiromi<sup>2</sup>, KOJIMA, Shigeaki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科, <sup>2</sup> 海洋研究開発機構

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>JAMSTEC

深海熱水噴出域や湧水域に生息する化学合成生物群集は、多くの固有種により構成されていることが報告されている (Tunnicliffe and Fowler, 1996)。北西太平洋に位置する熱水噴出域である沖縄トラフと伊豆・小笠原諸島海域では、地質学的背景や生物群集の優占種が大きく異なるため、海域間の遺伝子交流は少ないと考えられている。実際に、両熱水域から採集されたネッスイハナカゴの一種 *Neoverruca* sp. では、ミトコンドリア COI 遺伝子部分塩基配列を用いた遺伝的集団解析から、完全に遺伝的分化していることが明らかとなっている (Watanabe et al., 2005)。しかし、これら 2 つの熱水域に分布する生物種の遺伝的集団構造に関する知見は乏しく、その他の構成種についての知見はほとんどない。遺伝的集団構造を生活史の異なる種間で比較することで両海域の生物群集の関係性を詳細に理解することが可能になると期待される。そこで本研究では、沖縄トラフと伊豆・小笠原諸島海域で優占するオハラエビ科エビ類を対象に、遺伝的集団構造解析から両海域間の遺伝子流動を明らかにすることを目的とした。

本研究では、JAMSTEC の無人潜水艇「ハイパードルフィン」およびその支援母船「なつしま」による NT11-09 と NT11-20 航海で、南部沖縄トラフに位置する伊良部海丘と伊豆・小笠原諸島海域水曜海山で同種と考えられるオハラエビ類の一種 *Alvinocaris* sp. を採集した。遺伝的集団解析には、*Alvinocaris* sp. 各 20 個体のミトコンドリア COI 遺伝子部分塩基配列を用いた。

伊良部海丘と水曜海山から採集された *Alvinocaris* sp. には、遺伝的分化が見られなかった。一方で、*Alvinocaris* sp. 集団は、大きく遺伝的に異なる 2 つの種内系統群から構成されていることが明らかとなった。本発表では、詳細な遺伝的集団解析結果と生態情報や地質学的背景から、沖縄トラフと伊豆・小笠原諸島海域間のオハラエビ類の集団間のつながりやその歴史について考察を行う。

キーワード: 沖縄トラフ, 伊豆・小笠原諸島海域, オハラエビ類, 遺伝的集団構造

Keywords: Okinawa Trough, Izu-Ogasawara Arc, Alvinocaridid shrimps, Genetic population structure

## 飼育培養手法を用いた化学合成系無脊椎動物の共生菌-宿主関連性の実験的検討 Cultivating approach for understanding symbiont-host linkage of invertebrates in deep-sea chemosynthetic ecosystem

小西 正朗<sup>1\*</sup>, 和辻 智郎<sup>1</sup>, 中川 聡<sup>2</sup>, 秦田 勇二<sup>1</sup>, 高井 研<sup>1</sup>, 豊福 高志<sup>1</sup>

KONISHI, Masaaki<sup>1\*</sup>, WATSUJI Tomo-o<sup>1</sup>, NAKAGAWA Satoshi<sup>2</sup>, HATADA Yuji<sup>1</sup>, TAKAI Ken<sup>1</sup>, TOYOFUKU Takashi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構 海洋・極限環境生物圏領域, <sup>2</sup> 北海道大学 水産学部

<sup>1</sup>Institute of Biogeoscience (Biogeos), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), <sup>2</sup>Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University

深海の熱水噴出孔やメタン湧水域に見られる化学合成生態系に属する生物は、独立栄養共生菌を通じ、地殻から湧出する化学物質を利用することにより、太陽光に依存しない独自の生態系を形成している。これらの生物の共生菌-宿主関連性については、フィールドワークによる生育環境の調査、捕獲した宿主と共生菌の分子系統解析、近縁の自由生活型菌の培養特性等から推定されてきた。生理学的因子や環境因子と共生菌-宿主関連性について、因果関係を明確にして議論するためには、飼育環境における宿主生物や共生菌の振る舞いを詳細に解析することが望ましい。しかしながら、硫化水素やメタンなどの還元性ガス成分を供給・制御できる飼育システムが存在しなかった。そこで、我々は還元性・毒性が非常に高く飼育水槽中での濃度制御が困難である硫化水素の制御システムを構築し、低温、低酸素の深海環境を模倣した環境を再現し、硫化水素を低濃度で供給した場合のゴエモンコシオリエビとその剛毛に共生している外部共生菌の振る舞いを解析した。

本研究で用いたシステムでは、溶存酸素は光学式溶存酸素計を用いて監視し、脱気モジュールと給気用水流ポンプを on/off 動作させ、1 mg/L 程度に維持した。硫化水素ガスを脱気モジュール (MHF0504MBFT, 三菱レイヨン) を介して、飼育水中に供給した。気相中硫化水素はガスセンサー (TGS825, フィガロ技研) で検出した。硫化水素供給は on/off リレーを介して、硫化水素ガスの供給を制御する電磁弁とガス供給用モジュールへの循環ポンプの動作を制御した。温度は約 5 度で維持した。ROV を用いて、北伊平屋サイトの熱水噴出孔付近で採取したゴエモンコシオリエビを硫化水素添加水槽に 60 匹、硫化水素を添加しない水槽に 30 匹入れ、83 日間飼育した。残念なことに硫化水素添加水槽では 34 日目にクーラーシステムが故障したために、温度が 15 度付近まで上昇したので、その後バックアップシステムにて、飼育した。硫化水素濃度は 5~60  $\mu$  mol/l で連続的に供給できた。ゴエモンコシオリエビの生存率は無添加水槽では 90% であったのに対し、添加水槽で、73.3% であった。機器トラブルによる温度上昇で死亡した 8.3% を考慮しても、硫化水素を添加した場合、若干生存率が低下しているようであった。飼育後の剛毛を顕微鏡観察したところ、硫化水素を添加した場合、明らかに外部共生菌の数が増えているように思えた。そこで、リアルタイム PCR 法により剛毛の湿重量あたりの菌体数を推定したところ、硫化水素を添加した場合、無添加の場合と比べて外部共生菌量が 3 桁程度多いと推定された。さらに硫化水素存在下で飼育した固体の外部共生菌の分子系統解析を実施したところ、環境中のゴエモンコシオリエビの外部共生菌として報告がある -プロテオバクテリアの Marine epibiont group I に属する系統群や -プロテオバクテリアの *Sulfurovum*-affiliated bacteria に属する系統群の他、ホネクイハナムシ *Osedax mucofloris* の内部共生 -プロテオバクテリア、ツノナシオハラエビ *Rimicaris exoculata* の外部共生フラボバクテリア、自由生活型と推定できる -プロテオバクテリア、フラボバクテリアが検出された。一方で、硫化水素添加条件下では、白いバクテリアマットが得られた。バクテリアマットの系統解析を実施したところ、Marine epibiont group I を除く上記の共生菌近縁の系統群に加えて、アルビンガイ *Alviniconcha* sp. type 2 の内部共生菌と非常に近縁な系統群も検出された。飼育環境中でコシオリエビの剛毛上とバクテリアマット双方で増殖したと考えられる共生菌系統群の増殖は物理的もしくは化学的環境因子への依存性が高いことが示唆された。また、剛毛上のみで検出された Marine epibiont group I の増殖は宿主との生理的な増殖因子が必須である可能性がある。一方で、コシオリエビを採取した沖縄トラフから約 3,700km も離れた、Vienna Woods サイトの固有種であるアルビンガイの内部共生菌と非常に近縁なバクテリアが飼育環境中のバクテリアマットから得られたことから、これらの内部共生菌の系統群が地理的要因より化学環境要因に依存している可能性を示唆する興味深い発見であった。

このように飼育技術を基盤とした実験的な化学合成生態系生物-共生菌の関連性に関する研究アプローチでは、地理的要因を排除できるだけでなく、適当な比較実験により、物理的・化学的因子の影響の抽出が可能である。実験的なアプローチとフィールドワーク的なアプローチを統合することにより、化学合成生態系のさらなる理解を深めることができるだろう。

キーワード: 飼育水槽, 共生菌-宿主関連性, ゴエモンコシオリエビ, フィードバック制御, 半導体ガスセンサー

Keywords: rearing tank, symbiont-host linkage, *Shinkaia crosnieri*, feed-back control, semiconductor gas sensor