PR0146

原始地球海底熱水系で有機溶媒としてはたらく液体/超臨界 CO_2

○渋谷岳造[1]、高井研[1]
（[1]海洋研究開発機構）

生命誕生の場に関する仮説として、干潟説、海底熱水説、陸上温泉説、宇宙飛来説等多くの仮説が提唱されている。中でも海底熱水系は、エネルギー的非平衡状態を生み出す場所であり、原始地球において生命が代謝を開始・維持する条件が整っていることや、宇宙線などの地球外からの致命的な影響を受けにくいことなど、生命誕生の場として有利な条件の多くが揃っていると考えられている。しかしながら、海底熱水系は海水で満たされており、生命の誕生に必要な有機物や生体高分子が水によって分解されやすく、前生物的化学進化が困難である、という「ウォーター・パラドックス」とよばれる欠点が長年指摘されてきた。一方で、これまでの理論や地質記録解析からは、原始地球の大気や海洋は非常に CO_2 に富んでいたと考えられている。さらに、その CO_2 の多さゆえ、一部の CO_2 は気体ではなく、地殻深部などでは液体や超臨界といった凝縮した状態になっており、この液体/超臨界 CO_2 が生命の化学進化に重要な役割を果たした可能性について言及されることがあった（Fujioka et al., 2009; Schreiber et al., 2012）。これは、液体/超臨界 CO_2 が疎水性有機溶媒のような化学的性質を持っているからである。

そこで本研究では、熱水噴出孔の周辺や海底下に液体/超臨界 CO_2 を貯留する海底熱水系が現在の深海底に存在すること、そして、液体/超臨界 CO_2 は疎水性有機溶媒に似た化学的特性を持ちドライな環境を提供し得ること、を考慮して関連する研究のレビューを行った。そして、レビューに基づく理論的考察によって、原始地球にも液体/超臨界 CO_2 を貯留する海底熱水系が存在し得たかどうかを検証した。

現世において、液体/超臨界 CO_2 を海底下もしくは熱水噴出孔周辺に貯留している海底熱水系が日本近海の沖縄トラフやマリアナ弧に数カ所存在する。そして、これまでの調査から、このような海底熱水系の下には、大規模な液体/超臨界 CO_2 のプールが広がっており、熱水系全体が非常に CO_2 に富んでいることがわかっている（例えば、Sakai et al., 1990; Konno et al., 2006; Lupton et al., 2006; Kawagucci et al., 2011）。沖縄トラフ熱水活動域を例にとり、海底下で液体/超臨界 CO_2 が発生するメカニズムを推定した結果、1) マグマ溜まりから過剰に CO_2 が供給され、CO_2 濃度が高くなった高温熱水が海底下深部から海底に向かって上昇する過程で、相分離を起こし、より一層 CO_2 に富む熱水が発生すること、2) CO_2 が濃縮された熱水が海底下でより低温の間隙水や海水と混合することでさらに相分離を起こし、熱水中の CO_2 がさらに濃縮・精製され、ほぼ純粋な液体/超臨界 CO_2 が生成されること、3) 堆積物中の液体 CO_2 は周囲の海水との反応で海底下に CO_2 ハイドレート層の蓋を形成することにより、海水よりも密度が低く軽い液体/超臨界 CO_2

を海底下に貯留していること、などが推察された。また、このような解釈はこれまでの航海に基づく一連の先行研究とも調和的であった。

次に、初期地球の海底熱水系においても液体/超臨界 CO_2 が存在していたのかどうかについて地質学的な観点から検討を行った。西オーストラリア、ピルバラ地塊、ノースポール地域には約 35 億年前の海底熱水循環の痕跡がシリカダイクや石英脈としてよく残されている。これらの岩石の中には当時の海底下の熱水が流体包有物として保存されており、この流体包有物の均質化温度の分布をみると、海底下 1 km より深いところでは流体包有物が約 150 度程度の均質化温度を示しているものの、海底下 1 km より浅いところでは均質化温度は数十度から 350 度と広い温度幅を持っている。このことは上昇する熱水が深さ 1 km 付近で相分離を起こしていたことを示している（Kitajima et al., 2001）。また、相分離した熱水に由来する流体包有物には液体 CO_2 を保持しているものも多く存在する。したがって、35 億年前の海底下では CO_2 に富んだ熱水循環中に相分離が起こり、さらに CO_2 を高濃度で含む流体が発生していたと考えられる。現世の海底熱水循環でもマグマからの CO_2 インプットが大きい場合には、熱水の上昇時に相分離が起き、液体/超臨界 CO_2 が海底下に溜まっていることを考慮すると、これと同様の現象が初期地球の海底下でも起きていたと考えられる。

以上、現世の海底熱水系と太古代の地質記録の解析から、CO_2 に著しく富む海底熱水系において液体/超臨界 CO_2 が発生するプロセスが地球史を通じては起きていたことが示唆される。このことは、生命が誕生した冥王代の地球においても、液体/超臨界 CO_2 を貯留する海底熱水系が存在していた可能性が高いことを示している。液体/超臨界 CO_2 は有機溶媒としての性質を持ち、メタノール、酢酸、アルカンなどの有機物に対して高い混和性を示す。また、液体/超臨界 CO_2 は非極性を示すことから、液体/超臨界 CO_2 内での脱水縮合反応や、海水や熱水との境界面において両親媒性分子の配列や自己組織化が進行するかもしれない。さらに、液体/超臨界 CO_2 中では RNA など水溶液中では分解しやすい化合物が安定化することも知られている。したがって、海底熱水循環を通じて形成される液体/超臨界 CO_2 環境が、海底熱水環境において不利と考えられてきた生体材料の高分子化や自己組織化等の化学進化を促進する重要な役割を果たした可能性がある。この「液体/超臨界 CO_2 仮説」は、これまでの海底熱水説の弱点である「ウォーター・パラドックス」を克服し、海底熱水系が化学進化を効果的に促進する生命誕生の場であったとする新しい概念を提案するものである。

Liquid and supercritical CO_2 as an organic solvent in Hadean seafloor hydrothermal systems

*T. Shibuya[1] and K. Takai[1] ([1]X-star, JAMSTEC)