



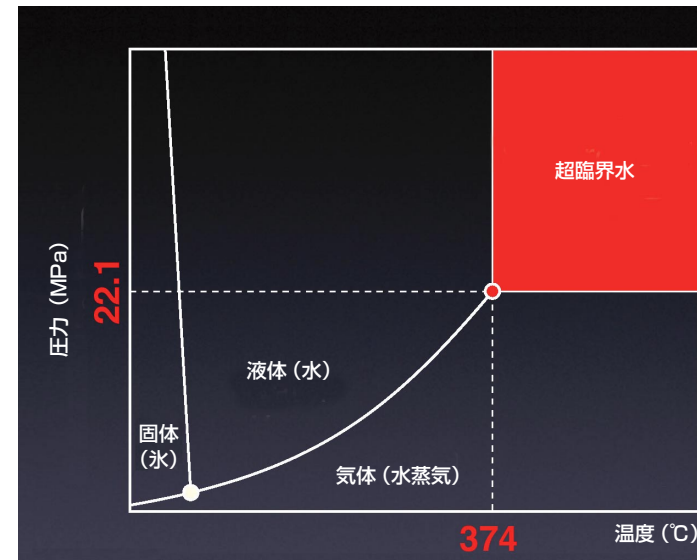
深海環境における高温・高圧の極限状態 超臨界水とその不思議を解明する

生命の起源に重要な役割を果たした可能性もある 超臨界水と化学反応場としての熱水噴出孔

水や二酸化炭素など様々な物質を高圧下でその温度を高めていくと、やがて気体とも液体とも異なる状態になる。この物理化学的な性質が大きく変化する境目を臨界点といい、臨界点を越えた状態を超臨界流体という。これまで超臨界流体は、その高い分解活性や物質をよく溶かし込むといった性質を活かして、環境浄化などのグリーンケミストリー（環境にやさしい化学）分野等で研究が進められてきた。だが、地球の極限環境の研究が進むなか、深海の高い圧力下で300℃を超える熱水噴出孔が次々と発見され、さらにその周辺環境から超好熱菌も見つかっていることから、極限環境生物フロンティア研究システムでは、微生物を取り巻く極限環境における高圧・高温の極限状態としての超臨界水に着目し、その性質を理解するための研究を行っている。さらに、深海の熱水噴出孔や海底下の地殻内部に超臨界水が存在する場合、どのような物理化学現象が出現するのか、生命の起源や化学進化との関連も視野に入れながら研究を推進している。



取材協力：
出口 茂 サブリーダー
極限環境生物フロンティア研究システム
深海環境応答研究グループ



水の相図
水は218気圧、374℃で気体と液体との境目がなくなり、超臨界流体となる。

液体でも気体でもない 超臨界水の不思議

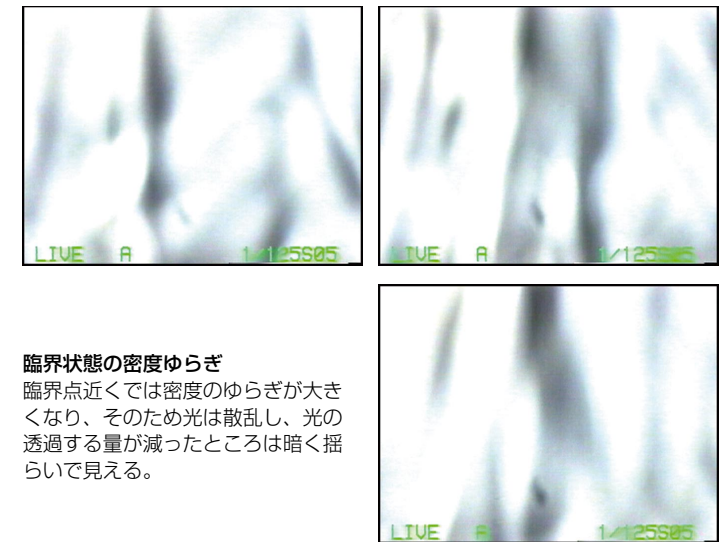
一般に、水は温度が0℃より高くなると氷（固体）から水（液体）になり、100℃で沸騰して水蒸気（気体）となる。ところが、水の沸点が圧力によって変化することを、私たちは生活のなかで体験している。たとえば、標高の高い山に登って調理しようとするとき、煮炊きに失敗することがある。気圧が低いために、100℃より低い温度で湯が沸騰してしまうためだ。反対に圧力鍋を使うと料理は早くできる。鍋の内部の圧力を高めることで、水の沸点を100℃以上にすることができるからだ。つまり、圧力を高くしていけば、水の沸点（液体と気体の境界となる温度）は上昇していく。そして、高温・高圧がある点にまで達すると、水は気体と液体の区別がつかなくなり、物理化学的にそのどちらでもない状態に変化する。この限界点を臨界点といい、臨界点を越えた物質状態（超臨界流体）にある水を超臨界水と呼ぶ。

水の臨界点は、温度が約374℃、圧力が約218気圧（22.1メガパスカル）だ。超臨界水になると、水が持つ物性も大きく変化する。密度は臨界点で0.6g/cm³程度まで低下し、界面は消失し、密度の熱的なゆらぎが大きくなり、光も散乱してゆらいで

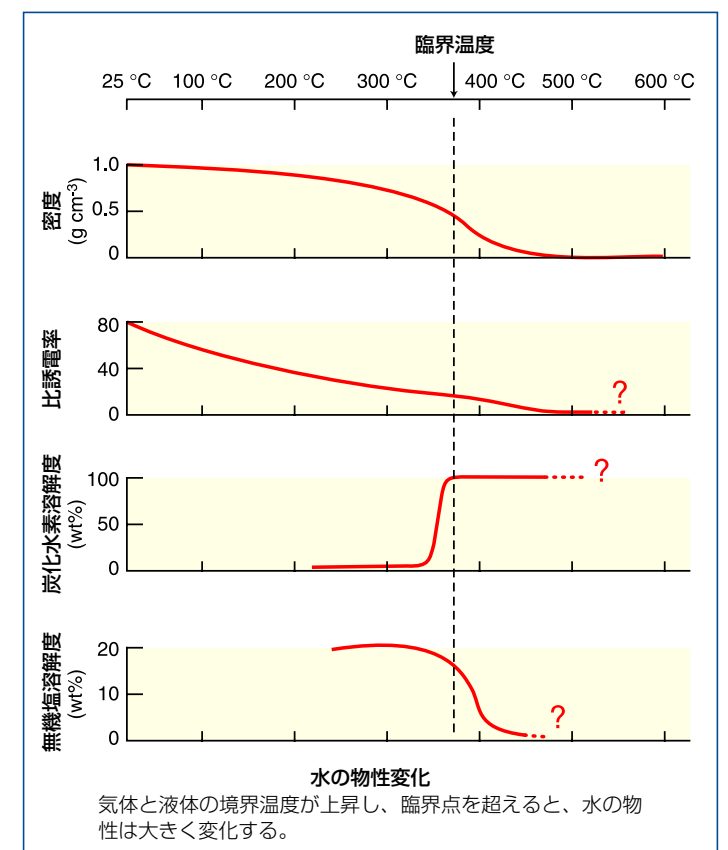
見える。さらに、比誘電率も非常に低くなる。比誘電率は極性の度合いを示すパラメーターとして見ることもできる。水は超臨界状態になると比誘電率が低くなり、極性がないトルエン、ベンゼンなどの有機溶媒のような振る舞いを見せる。つまり、水のなかに入れると分離する油も、超臨界水とは自由な割合で混ぜることが可能になる。

一方、水にはよく溶ける塩化ナトリウムのような無機塩類は、逆に超臨界水にはほとんど溶けなくなってしまう。

超臨界水のこうした特性を活用した研究は、現在、化学工学の分野を中心に進められている。たとえば、有害物質として問題になっているPCBやダイオキシンを、超臨界水を使って安全に処理する研究もそのひとつだ。難分解性の有害物質を、超臨界



臨界状態の密度ゆらぎ
臨界点近くでは密度のゆらぎが大きくなり、そのため光は散乱し、光の透過する量が減ったところは暗く揺らいで見える。

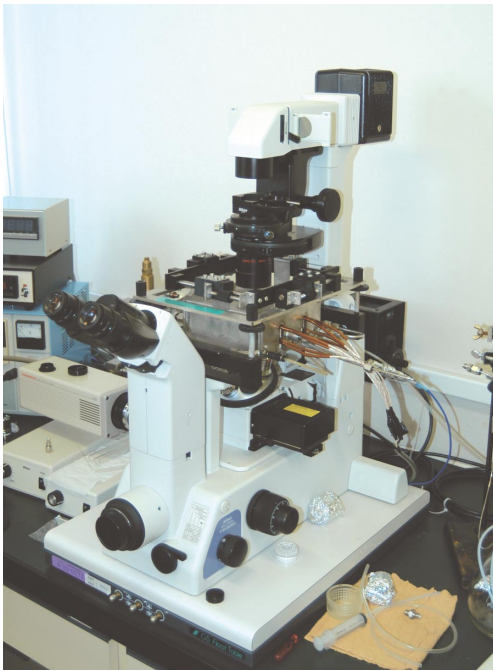


水の物性変化
気体と液体の境界温度が上昇し、臨界点を超えると、水の物性は大きく変化する。

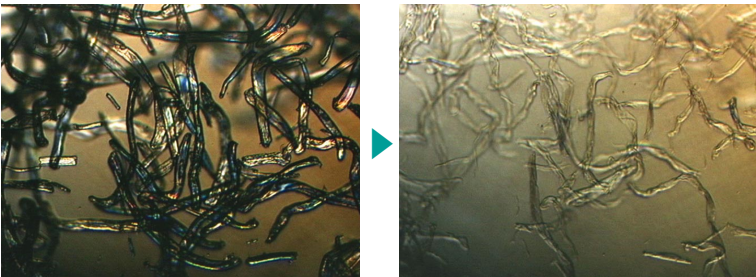
水に溶かし込んで分解（無害化）させようとしている。また、生活廃水の処理に超臨界水を活用する研究もすでに実用化されている。

極限環境としての 超臨界水に注目

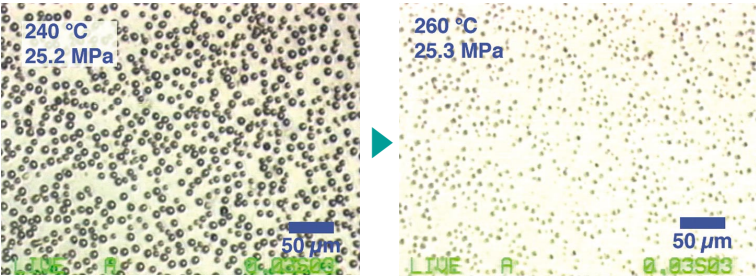
極限環境生物フロンティア研究システムが、この超臨界水に注目したのは、自然界



超臨界水研究のために新たに開発された高温・高圧光学顕微鏡。



結晶性セルロースの亜臨界水への溶解
常温・常圧では水に溶けないセルロースも約250気圧、330℃（右）で溶解し始めた。



熱水中で崩壊する深海酵母
通常の酵母菌に比べて非常に強固な細胞壁を持つ深海酵母菌は、約250気圧、240℃（左）では球形の細胞構造を保っていたが、260℃（右）ではほとんどが崩壊した。

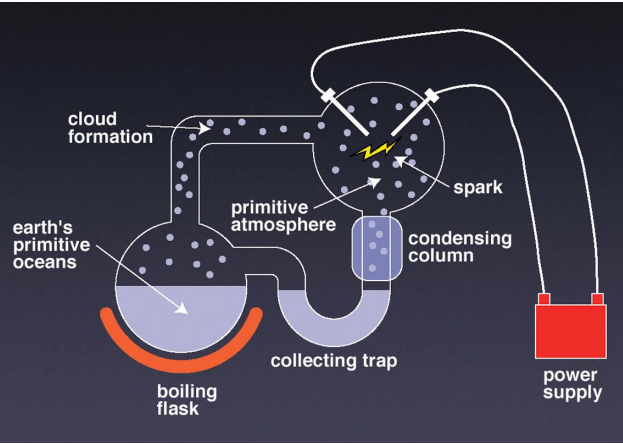
にも超臨界状態にある水が存在するのではないかという予測に基づいている。海洋の平均水深は約3,700m。圧力は、深度10mごとに1気圧ずつ高まるため、超臨界水の圧力条件（218気圧）は、平均水深より浅い深度約2,200mでクリアしていることになる。また、深海の温度は2～4℃でほぼ一定しているが、深海底の海嶺と呼ばれるプレート生成域や海底火山の周辺には、非常に高温の水が噴き出す熱水噴出孔が存在し、そこでは360℃を超える高温の熱水も確認されている。現在のところ、水の臨界温度である374℃を超える温度の記録はないが、熱水噴出孔やその下の地殻内に、超臨界状態の水が存在する可能性は極めて高いといえる。一方、極限環境生物フロンティア研究システム・地殻内微生物研究領域の研究では、300℃を超える熱水を噴き出す熱水噴出孔環境で採取された試料から、新規超好熱菌が分離されている。水の臨界条件（374℃、218気圧）は、生命活動にとって過酷ではあるが、超臨界水が生物と無縁の場所とは言い切れなくなっている。高温・高圧の極限環境と生物の関係を考える上で、超臨界水を避けて通ることはできない。そこで、極限環境生物フロ

ンティア研究システムでは、極限環境としての超臨界水そのものの物理化学的特性を把握するとともに、超臨界水を含めた高温・高圧環境の水のなかで、微生物などの生き物や生体関連物質はどのような挙動・化学反応を見せるのかといった研究を展開している。

高温・高圧状態を観察する顕微鏡システムを開発

超臨界水と生命現象とを関連づけた研究を行っていくために、出口 茂サプリーダーらが取り組んだのは、高温・高圧中の微生物や生体高分子を観察するための高い光学解像度を持つ高温・高圧光学顕微鏡システムの開発だった。試料を入れるセルおよびその窓は、高温・高圧に耐える物理的強度に加え、超臨

界水による腐食を考慮して選択する必要があった。セル本体には耐腐食性に優れたニッケル超合金（インコネル600）、光学窓には天然ダイヤモンドが使われている。また、セル本体と窓は熱膨張率の違いによる圧力漏れを防ぐために、チタン製の部品を使った特殊なシーリングが施されている。このほか、セルには精密な圧力制御、温度調節を実現するために様々な工夫が凝らされている。高温・高圧光学顕微鏡システムの開発によって、超臨界水のなかで、微生



S.L.ミラーの実験

左下のフラスコは原始海洋、右上はメタン、アンモニア、水素の混合気体からなる原始大気。海洋から蒸発した水蒸気が雲となって大気と混ざり、そこで雷の放電をおこす。冷えて雨となった水の中にはアミノ酸が含まれていた。



熱水噴出孔がタンパク質生成の化学反応場になったことを実験で再現するためにつくられた流通型反応装置。

物や生体高分子がどのような振る舞いを見せるかを詳しく観察することが可能になった。

出口サプリーダーらは、この顕微鏡システムを活用して、高温・高圧下の水のなかで微生物がどのように変化するかを、水深6,500mの深海底から分離された酵母菌の一種を用いて観察した。その結果、約250気圧で200℃を超える温度でも、細胞構造はしっかりと維持されていた。さらに加熱すると、250℃で細胞構造が急激に崩壊する様子が観察された。さらに、地球上最大のバイオマスで細胞壁の主構成多糖であるセルロースを水に入れて、高温・高圧下での挙動を観察した。約250気圧、290℃から徐々に温度を上昇させると、320℃を超えるあたりからセルロースは結晶構造が融解し、その後直ちに溶解した。

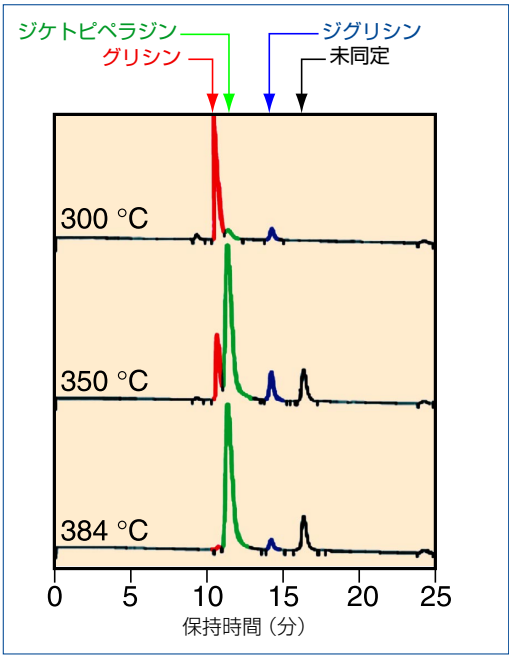
生命誕生の鍵を握る超臨界水

実験から、物質を長時間にわたって高温・高圧状態に置くと分解が進んでいくことが分かった。では、瞬間的に高温で加熱するとどのようなことがおきるだろうかと。出口サプリーダーらは、熱水噴出孔で冷たい海水が噴き出す熱水に混ざり、瞬間的に温度が上昇した後に、再び冷やされるとい

う状況のなかで何がおきるのかを実験装置で再現しようとした。熱水噴出孔が化学反応場としてどのような効果を持つのかを探ってみようと思ったのだ。

生命の起源を解明するための実験としてよく知られるのは、1954年、S.L.ミラーの実験だ。彼は、原始地球の大気としてメタン、アンモニア、水素の混合気体を用意し、そこに水蒸気を送り込み、そのなかで放電を行い、水蒸気が冷えて水になったとき、そのなかにグリシン、アラニンなどのアミノ酸ができていたのを見つけた。つまり、原始大気から無機的にアミノ酸が生まれる可能性を示した。確かにアミノ酸は化学進化にとって重要だが、さらにアミノ酸が脱水反応によってつながり、タンパク質になることが、さらに重要なのだ。生体高分子といわれるタンパク質、DNA、多糖は、いずれもこの脱水反応によって生まれる。ところが、自然の水のなかでは、一般にこうした反応はおきにくい。そこで、熱水噴出孔で高温・高圧の超臨界水に瞬間的に接することで反応が起きるのではないかと、出口サプリーダーらは考えたのだ。

このための反応装置を開発し、実際に実験を行った。圧力は臨界圧力をやや上回る219気圧、一時的（約10秒間）に高める温度は300℃、350℃、384℃に設定した。



実験で得られたグリシンの反応挙動

300℃では、グリシンだけが出てほとんど何もおきなかった。350℃に高めると、グリシンのピークは減り、ジケトピペラジンという物質のピークが高まり、384℃の超臨界状態ではほとんどがこの物質だった。グリシンがタンパク質になるプロセスは、脱水反応によってジグリシンになり、さらにトリグリシンになるという反応が続いてつながっていくのだが、実験では、第1段階の脱水反応によってジグリシンになったものの、第2段階の脱水反応ではジグリシンが自分のなかで反応して別の物質となり、反応が止まってしまったことを示していた。確かに、実験によって超臨界の水によって脱水反応は進み、アミノ酸が結合することは確認できた。結合する量が増えれば、タンパク質が生まれる可能性がある。そして、熱水噴出孔から噴き出した超臨界水が、タンパク質をつくり出すための触媒として機能した可能性もある。

今はまだ、生命の起源において超臨界水が重要な役割を果たしたかどうかは分からない。それ以前に、超臨界水の性質そのものも分からないことが多い。その不思議が明らかになったとき、生命誕生の謎が解明されるかもしれない。