ミニシンポジウム 二酸化炭素の海洋隔離技術と生物への影響

Ⅲ-3. 魚類成体への影響

石松 惇,¹ 林 正裕,¹ 喜田 潤²¹長崎大学水産学部附属海洋資源教育研究センター, ²海洋生物環境研究所

III-3. Effects on Adult Fish

Atsushi Ishimatsu,¹ Masahiro Hayashi,¹ Jun Kita²¹Marine Research Institute, Faculty of Fisheries, Nagasaki University, 1551-7 Tairamachi, Nagasaki 851-2123, ²Marine Ecology Research Institute, Onjuku, Chiba 299-5105, Japan

魚類は水中に乏しい O_2 を効率よく得るため、酸素摂取能力が高い鰓を発達させている。鰓表面では、口から鰓孔へと流れる水が逆行する血液の流れと、僅か数ミクロンの上皮を介して接しており、非常に効率の高いガス交換が営まれている。 O_2 と比較すると分子状 CO_2 は水に対する溶解度が約 30 倍も大きく、従って、魚類は CO_2 排出に関しては過呼吸の状態にある。その結果、魚類体液の CO_2 分圧 (P_{CO_2}) は 0.27~0.54 kPa (1 kPa = 7.5 mmHg) と、陸上生物の体液 P_{CO_2} と比べると 1 桁低くなっている。従って、水中 P_{CO_2} の僅かの上昇も鰓を介しての P_{CO_2} 勾配を逆転させ、体液 P_{CO_2} を増加させる可能性がある。鰓を通して体液中に急速に拡散した CO_2 は、 $H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- \rightarrow CO_3^{2-}$ へと解離し、体液 pH を低下させることによって生体に様々な生理的影響を与える。¹⁾

CO_2 が魚類に与える影響については、現在までほとんどが淡水産の種で調べられており、海産魚類についての知見は極めて限られている。2001 年 3 月の時点で、 CO_2 が魚類に与える影響について文献検索を行って得られた総文献数 99 編の中、淡水魚を用いた研究が全体の 4 分の 3 を超える 79 編を占め、海産魚では軟骨魚類を用いた研究が 10 編、海産真骨魚類を用いた研究は 9 編に止まった。実験期間に関しては、海産魚に限って見ると最長の実験期間でも 120 時間に止まっていた。

1. 急性毒性

CO_2 を 5% 以上含む空気中で平衡させた海水中では、短時間の中に海産の真骨魚類は斃死する (林・Cuéllar・石松 未発表)。ヒラメでは、4% CO_2 に平衡させた海水中 ($P_{CO_2}=4$ kPa) では 72 時間まで斃死率 0% であったが、5% では 48 時間以内に全個体 (N=5) が斃死した。ブリでは、斃死時間はより短く、5% CO_2 に平衡させた海水中で 8 時間以内に全個体の斃死が起こった。ヨーロッパの海産 seabass (*Dicentrarchus labrax*) で、96 時間及び 120 時間 LC_{50} はそれぞれ P_{CO_2} 6.72 kPa, 6.28 kPa と報告されている。²⁾ またマダイで P_{CO_2} 5.6~

6.0 kPa で 22 時間斃死率 40%, これ以上では全個体が死亡したとの報告がある。³⁾

2. 血液酸素運搬能

P_{CO_2} の上昇に伴ってヘモグロビンの酸素親和性は生理的 pH の範囲内では低下する。この効果は軟骨魚類を除く脊椎動物一般の血液に関して認められ、Bohr 効果と呼ばれる。これに加えて、真骨魚類では P_{CO_2} の増加は酸素容量をも低下させる (Root 効果)。高 CO_2 環境下ではこれらの効果のために、ヘモグロビンと酸素との結合が抑制される。真骨魚を高 CO_2 環境に移行させた時、血液 P_{CO_2} の上昇による pH の低下がおき、動脈血の酸素飽和度がいったん低下することがある。このような条件の下では頭腎クロム親和性細胞から血液中にカテコルアミンが放出される。カテコルアミンは、赤血球膜表面に存在する β 受容体に作用して膜の Na^+/H^+ ポンプを活性化させ、ヘモグロビンの酸素飽和度を回復させるように働く。また血中カテコルアミン濃度の上昇は脾臓からの赤血球の放出を促し、ヘマトクリットを増大させる。⁴⁾

3. 呼吸運動

一般に魚類を含む水生動物の換水運動は、酸素の摂取を主要な調節因子として機能しているといわれ、 CO_2 の排出が換気の主な調節因子となっている空気呼吸動物における換気調節機構と対比されてきた。⁵⁾ しかし、最近 CO_2 の呼吸刺激因子としての重要性を示唆する実験結果が報告されるようになり、従来の見解の見直しが迫られている。

4. 酸塩基平衡

高 CO_2 環境に曝露された場合の魚類の血液 pH は、急速なしかし一過性の低下とそれに続く正常 pH への回復が特徴である。この時、血液の HCO_3^- は時間とともに負荷された CO_2 レベルに応じて上昇する (図 1A)。酸性水に曝露された場合の応答は、これとは異なり曝露初期の急速な低下と回復は見られない (図 1B)。

CO_2 レベルの上昇によって引き起こされる体液 pH の

図1 CO₂ 及び酸性水曝露時の血液 pH と血漿 HCO₃⁻ イオン濃度の変化。(A)ヒラメ: 3% CO₂ 曝露, 水温 20℃ (林・石松 未発表), (B)ウナギ: 酸性水 pH 4.5, 水温 20℃ (石松・田川 未発表)。

低下(呼吸性アシドーシス)に対する補償は, 水中動物の場合, 主に環境水中への酸排出によって行われる。CO₂ 曝露開始直後の血液 pH の低下幅は, 同時に起こる環境水の pH 低下の幅よりもかなり小さく保たれる (1

%CO₂ 条件下で, 海水 pH は 8.2 から 7.0 へ低下するのに対し, 血液 pH の低下幅はヒラメで 0.15, プリで 0.09 (林・Cuéllar・石松 未発表)。CO₂ 曝露時の pH 回復速度は海産魚で早く, 淡水魚では遅い。魚類では鰓が主な排出器官であり, 腎臓の寄与は一般に僅かである。⁵⁾ 環境水 Pco₂ が 1~2 kPa の場合, 淡水魚・海産魚を問わず血液 pH の回復時に, ほぼ 1:1 のモル比で血液 HCO₃⁻ 濃度の上昇に伴う Cl⁻ 濃度の低下が起こる。しかし, ヒラメ及びプリを用いた実験では, CO₂ レベルがより高くなると血液 Na⁺ 濃度が顕著に上昇する結果が得られた。また血液 pH が回復した後に, 実験魚の斃死が起きており, 死因として血液 pH 以外が重要だと思われる (林・Cuéllar・石松, 未発表)。

5. 今後の研究課題

高 CO₂ 環境下での死因を解明すると共に, 長期曝露試験による成熟, 内分泌など広範な生理機能に対する影響調査を行う必要がある。高 CO₂ 環境下での生理反応は, 酸性水に対する反応と全く異なっており, この点に留意して研究を進めるべきである。

文 献

- 1) 石松 惇, 喜田 潤. CO₂ が魚類に与える影響について. 魚類学雑誌 1999; **46**: 1-13.
- 2) Grøttum JA, Sigholt T. Acute toxicity of carbon dioxide on European seabass (*Dicentrarchus labrax*): Mortality and effects on plasma ions. *Comp. Biochem. Physiol.* 1996; **115A**: 323-327.
- 3) 竹田達右, 板沢靖男. 二酸化炭素麻酔の活魚輸送への応用可能性の検討. 日本誌 1983; **49**: 725-731.
- 4) Nikinmaa M, Salana A. Oxygen transport in fish. In: Perry SF, Tufts B. (eds) *Fish Respiration*, Academic Press, San Diego, 1998; 141-184.
- 5) 石松 惇. 「魚類生理学」恒星社厚生閣, 東京, 1991; 35-65.