

IPCC 特別報告書に記載された CO<sub>2</sub> の海洋環境影響（生態影響）

この資料は、IPCC 特別報告書“Carbon Dioxide Capture and Storage”（2005）の第 6 章「海洋隔離（Ocean Storage）」のうち、「6.7 海洋への影響、リスク及びリスク管理」の概要をまとめたものである。第 6 章は、中深層における海洋隔離（海水への溶解、あるいは海底面への貯留）に伴う CO<sub>2</sub> の海洋環境への影響等を集約したものであり、今般検討している海底下の貯留層（あるいは坑井口付近）から漏洩する CO<sub>2</sub> による影響を検討対象としたものではないことに留意が必要である。

## 1．海洋生物に対する影響 [ IPCC 特別報告書 6.7.1 ]

- ( 1 ) CO<sub>2</sub> を実験的に深海へ大量投入した前例はないため、CO<sub>2</sub> の影響に関しては主として室内実験及び小規模な現場実験並びにこれらに基づく概念モデル及び数学モデルを用いた推測に依らざるを得ない。
- ( 2 ) ナチュラルアナログ（Box 1）は参考となるが、ここで取り上げている海洋隔離とは大幅に異なる。
- ( 3 ) 海洋表層と比較して深海の大部分は安定しており、物理化学的要素の経年変化も少ない。進化的淘汰の過程により、環境変動に適応できる個体はおそらく排除されてきたのだろう。ゆえに、深海生物は浅海域の生物に比べて、環境の擾乱に対する感受性が高い可能性がある（Shirayama, 1997）。
- ( 4 ) 現存する多くの動物は概して低 CO<sub>2</sub> 濃度の環境に適応しており、常時上昇した CO<sub>2</sub> 濃度に生物がどこまで適応できるかは不明である。CO<sub>2</sub> 濃度が高くで強い酸性の水への暴露は急性致死をもたらす可能性があるが、CO<sub>2</sub>、pH、炭酸のより幅の小さい変化には少なくとも一時的には耐えられる可能性もある。
- ( 5 ) 浅海生物の研究では、化学的環境の変化が動物相へ与える影響といった様々な生理学的機構が働くことが確認されているが、その知見だけでは生態系レベルでの影響について完全に評価することは困難である。繁殖周期や個体の生存期間以上にわたる長期的影響については見過ごされがちだが、これらが生態系に深刻な変化をもたらす可能性がある。
- ( 6 ) 外洋の生物は、低濃度で比較的安定した CO<sub>2</sub> 環境にいるため、CO<sub>2</sub> 暴露に対して敏感である可能性があり、対象的に底泥中、特に潮間帯に生息する生物は、CO<sub>2</sub> 濃度が常に変化する環境におかれているので、CO<sub>2</sub> 濃度が高く、変りやすい環境に適応しやすいと考えられる。CO<sub>2</sub> への適応に関する生理学的機構は主にこれらの生物において観察されており、これらの生物はエネルギー消費を一時的に下げることによって CO<sub>2</sub> 濃度の上昇に対応するが、このような対応は長期にわたると生物にとって有害になり、活動性や生殖性の低下などの弊害を起こす。また総じて海洋無脊椎動物は、魚類より CO<sub>2</sub> 濃度の変化に敏感である（Pörtner et al., 2005）。
- ( 7 ) CO<sub>2</sub> の影響は主として浅海域に生息する魚類及び無脊椎動物について研究されてきたが、これらの中には 2,000m 以深の海域にまで分布する種や、低温環境に適応した種もいる

(例: Langenbuch and Pörtner, 2003, 2004)。深海で二酸化炭素を用いたいくつかの *in-situ* 生物実験も実施されている (Box 2 参照)。また、これまでの浅海生物の研究から、動物に影響を与える化学的環境の変化に起因する様々な生理学的作用が特定されている。

### Box1. ナチュラルアナログ及び地球の歴史 [IPCC 特別報告書 Box 6.5]

CO<sub>2</sub> (または有害物質) が過剰に存在するような自然環境の多くは、そのような環境に進化の過程で適応した生物の生息域となっている。地球の歴史上において、海洋の多くの場所がかつて、今日では全て絶滅したであろうが、pCO<sub>2</sub> の上昇に適応した生物の生息域であったであろう。この事実は、ナチュラルアナログあるいはこれまでの歴史的情報を利用して CO<sub>2</sub> の注入による現存の海洋生物への影響を予測または一般化することを困難にしている。

CO<sub>2</sub> を多く含む液体の噴出: 熱水噴出口は、CO<sub>2</sub> 濃度の高い液体を海洋に噴出しているため、CO<sub>2</sub> の挙動と影響の研究に有効と考えられる。例えば、Sakai *et al.* (1990) は、86–91% の CO<sub>2</sub> を含む (その他の構成物質として硫化水素、メタンなどを含む) 液体を形成する浮揚性水和物が、水深 1,335–1,550m の海底の熱水噴出口から放出されるのを観測した。こうした液体は重度に汚染された産業 CO<sub>2</sub> 源と類似したものである。また、CO<sub>2</sub> 濃度が高く低 pH な (3.5–4.4) 液体の海底噴出口も熱水システムの中に見られる (Massoth *et al.*, 1989; Karl, 1995)。

火山性噴出口付近の深海生態系は、化学エネルギー及び CO<sub>2</sub> の地化学的なインプットによって維持することが可能である。このような海域や、噴出流の調査が実施されたにもかかわらず、産業 CO<sub>2</sub> の貯留影響との関連づけにまでは至っていない。しかし、これらの調査は、動物相が高濃度の CO<sub>2</sub> 環境にどう適応してきたかの手がかりとなるものである。また、通常の海水に適応した生物が、CO<sub>2</sub> 濃度上昇へどう反応するかという知見は得られていない。

地質学的時間における変化: 地球の歴史上のある時期において、海水には現在より多量の無機炭素が溶解し、低 pH だった可能性がある。例えば、Barker and Elderfield (2002) は、プランクトン型有孔虫の数種の殻の重量に見られる氷期 - 間氷期の変化は、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度との間に負の相関関係があり、因果関係を示唆していることを明らかにした。

また、CO<sub>2</sub> は後期二畳紀 ~ 三畳紀の大量絶滅の主要な要素であった可能性が考えられている。これによりサンゴ、腕足動物、コケムシ、棘皮動物は、軟体動物、節足動物、脊索動物よりも多大な影響を受けた (Knoll *et al.*, 1996; Berner, 2002; Bambach *et al.*, 2002)。Pörtner *et al.* (2004) は、これが石灰化に強く依存した骨格に対する CO<sub>2</sub> の腐食作用に起因するもの、という仮説を立てている。

### Box 2. 深海生物の二酸化炭素に対する反応の *in-situ* 観測 [IPCC 特別報告書 Box6.6]

深海生物の CO<sub>2</sub> 増加に対する反応の *in-situ* 観察

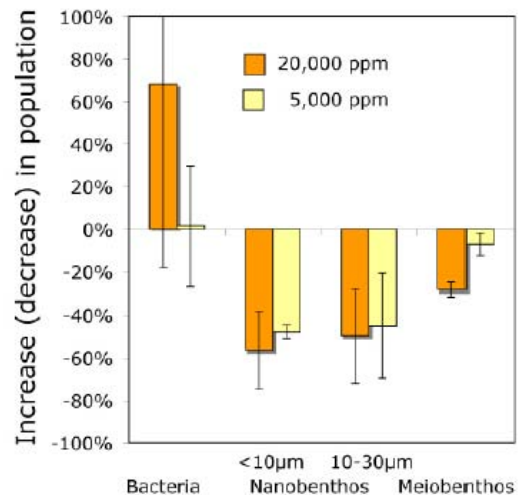
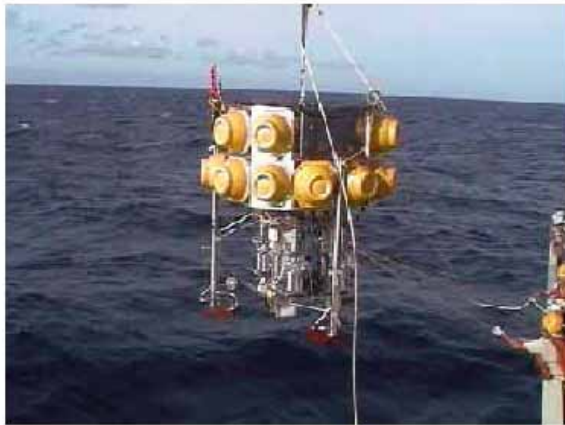
カリフォルニア州沖の大陸棚斜面付近における深海動物の CO<sub>2</sub> 暴露による影響 (行動・生存性) 評価 (Barry *et al.*, 2004; Barry *et al.*, 2005; Tamburri *et al.* 2000)

20~70kg の液体 CO<sub>2</sub> を深さ 3,600m の海底の小さな囲いに放出し、液体 CO<sub>2</sub> に暴露した動物の反応を観測した。その結果、ナマコ類 (*Scotoplanes* sp.) とクモヒトデ類 (opiuroids 不明種) は暴露した直後に死亡した。また、数個体 (5 個体以下) の深海魚 (ヨロイダラ; *Coryphaenoides armatus*) は CO<sub>2</sub> に接触した直後、泳いでその場から離れた。飽和 CO<sub>2</sub> に対する生物の挙動反応を調べる深海実験では、あるスカベンジャー種 (深海メクラウナギ; hagfish) は、崩れ落ちた餌からの化学的な信号がある場合には酸性で CO<sub>2</sub> 濃度の高い水を避けずに、CO<sub>2</sub> に富み、かつ、餌の匂いのするブルームと接触を続け、あたかも「麻酔状態」に陥ったかのようにであった。

pH の変化及び CO<sub>2</sub> プールからの距離によって、CO<sub>2</sub> の溶解したプルームに暴露した深海動物の生存率は異なった。非常に大きな pH の低下 (1~1.5pH 値) に一時的に暴露し、CO<sub>2</sub> プールの近く (<1m) に存在した動物は、80% という高い死亡率を示した。そして、CO<sub>2</sub> プールから 3~10m と比較的遠く、pH の低下も 0.1~0.2 と穏やかであった海域にいた動物の死亡率は 20~50% であった。どちらも対照海域の通常状態の動物の死亡率よりも高かった。しかし、この死亡率の増加が、短期的な pH/CO<sub>2</sub> の変動によるものなのか、pH の慢性的かつ穏やかな変化によるものなのかは不明である。

Kumano 海溝下 2,000m における pCO<sub>2</sub> の上昇による生物の個体数及び多様性に与える影響調査  
(Ishida *et al.*, 2005)

実験用チャンパーを用いて pCO<sub>2</sub> を 5,000ppm 及び 20,000ppm まで上昇させ、pH をそれぞれ 6.8 と 6.3 まで低下させた。メイオベントスでは、一部を除き、顕著な影響はみられなかったが、ナノベントスの個体数はほとんどの場合に減少し、細菌は 20,000ppm において個体数が増加した。



ハワイの Loihi 海山における CO<sub>2</sub> 濃度の深海 megafauna に与える短期的影響の調査 (Vetter and Smith, 2005)

深さ 1,200 ~ 1,300m の Loihi 海山から自然に放出されている CO<sub>2</sub> 流中に餌を設置し、潜水艦を使って餌によっておびき寄せられた生物を観察した。その結果、噴出口特有の (vent-specialist) エビが餌におびき寄せられ、高濃度 CO<sub>2</sub> に既に適応していることを示したが、自由遊泳性の端脚類、ホラアナゴ、カグラザメは CO<sub>2</sub> 流中に設置された餌を回避した。

## 2 . CO<sub>2</sub> の生理学的影響 [ IPCC 特別報告書 6.7.2 ]

### 2 . 1 水中呼吸の変温動物への CO<sub>2</sub> 影響

( 1 ) 生命体 ( 又はその一部 ) が高濃度の CO<sub>2</sub> にさらされると高炭酸症を引き起こす。呼吸疾患、昏睡 ( 麻酔 )、致死が最も顕著な短期的影響であるが、より低濃度であってもより長期的に重大な影響を持つ可能性がある ( Pörtner and Reipschläger, 1996; Seibel and Walsh, 2001; Ishimatsu *et al.*, 2004, 2005; Pörtner *et al.*, 2004, 2005 )。

( 2 ) 生物が適応している CO<sub>2</sub> 濃度が、重大な急性影響の CO<sub>2</sub> 閾値に影響することが考えられるが、適応能力の幅は今日まだ研究されていない。

### 2 . 2 CO<sub>2</sub> による影響と pH による影響の比較

- ( 1 ) 一般的に CO<sub>2</sub> の許容限度は海水の pH 又は CO<sub>2</sub> 分圧 ( *p*CO<sub>2</sub> ) の変化により特徴付けられてきた (Shirayama, 1995; Auerbach *et al.*, 1997 を参照) 。しかし、CO<sub>2</sub> が海水に溶解する ( 表 1 ) ことによる影響は、*p*CO<sub>2</sub> が上昇することによる pH の低下 ( 酸性度の上昇 )、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 濃度の減少 ( 飽和度の低下 ) であり、これらによる底質中や生物の殻に含まれる CaCO<sub>3</sub> の溶解が、炭酸塩 ( CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ) から重炭酸塩 ( HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ) の生成につながる ( 下記式参照 ) 。

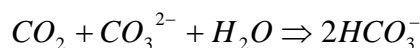


表 1 ΔpH、 *p*CO<sub>2</sub> と、平均的な深海環境下で計算された無機炭素溶解濃度の関係。1t の CO<sub>2</sub> を特定のΔpH まで希釈するために必要な水の体積、このΔpH を作り出すのに必要な CO<sub>2</sub> の量 ( 海洋に均一に分散させることを想定 ) も示されている。

pH change ΔpH	Increase in CO <sub>2</sub> partial pressure Δ <i>p</i> CO <sub>2</sub> (ppm)	Increase in dissolved inorganic carbon ΔDIC (μmol kg <sup>-1</sup> )	Seawater volume to dilute 1 tCO <sub>2</sub> to ΔpH (m <sup>3</sup> )	GtCO <sub>2</sub> to produce ΔpH in entire ocean volume
0	0	0	-	-
-0.1	150	30	656,000	2000
-0.2	340	70	340,000	3800
-0.3	580	100	232,000	5600
-0.5	1260	160	141,000	9200
-1	5250	400	54,800	24,000
-2	57,800	3,260	6800	190,000
-3	586,000	31,900	700	1,850,000

- ( 2 ) 周辺の水と体液中それぞれの CO<sub>2</sub> 分子、炭酸塩、重炭酸塩の濃度変化は、海洋生物にそれぞれ異なる影響を及ぼす可能性がある (Pörtner and Reipschläger, 1996) 。
- ( 3 ) 魚類や脊椎動物のような水中呼吸生物では、CO<sub>2</sub> が体内に侵入することにより、直ちに炭酸塩基状態が攪乱され、その攪乱はイオン交換作用 (ion exchange mechanisms) により補正される必要がある。
- ( 4 ) CO<sub>2</sub> が蓄積することによる急性影響は、pH や炭酸イオン濃度の低下よりも深刻である。例えば魚類の稚魚は、低 pH・低 CO<sub>2</sub> に対する感受性よりも低 pH・高 CO<sub>2</sub> に対する感受性の方が高かった (曝気で *p*CO<sub>2</sub> レベルを低く維持しつつ、HCl を添加することで得られたもの : Ishimatsu *et al.*, 2004 ) 。
- ( 5 ) CO<sub>2</sub> の溶解による pH の変化は、CO<sub>2</sub> とは直接関係のないメカニズムにより海洋生物に影響を与える場合がある。( CO<sub>2</sub> 蓄積を付随しない ) pH の低下による水生生物への影響に関する研究には長い歴史があり、特に淡水生物の研究に重点が置かれてきた (Wolff *et al.*, 1988)。( 一定の *p*CO<sub>2</sub> における ) pH の低下がもたらす影響としては、藻類と従属栄養細菌の生産物 / 生産力の様態 ( pattern ) の変化、生物における石灰化 / 脱石灰化作用の変化、動物プランクトン種、海洋底生生物種、及び魚類に対する急性または亜急性の代謝影響などが含まれる。
- ( 6 ) さらに、海洋環境における pH の変化は、1 ) 炭酸塩システム、2 ) 硝化作用 (Huesemann *et al.*, 2002)、及び、リン酸塩、ケイ酸塩、アンモニアなどの栄養素の化学形態 (specification, Zeebe and Wolf-Gladrow, 2001) 、3 ) 必須あるいは有毒な微量元素の化学形態とその摂取に影響を及ぼす。

(7) 観測結果及び化学計算によれば、一般的に低 pH 条件下では金属の微粒子への結合が低下し、生物学的に利用可能な遊離金属 (free metals) の割合が増加することが示されている (Sadiq, 1992; Salomons and Forstner, 1984)。水生無脊椎動物は必須および非必須金属の両方を摂取するが、金属の最終的な体内濃度は、生物種によって幅広く異なる。多くの微量金属の場合、遊離状態の金属が毒性学的意味を最も強く示すため、生物学的利用率の増加は毒性を引き起こす可能性が高い (Rainbow, 2002)。

### 2.3 急性影響

- (1) CO<sub>2</sub> の蓄積と摂取は多くの動物群で知覚麻痺を引き起こすことがある。これは熱水噴出口付近の深海動物や実験 CO<sub>2</sub> プールにおいて観察されている。高濃度の CO<sub>2</sub> (濃度不特定) の持つ麻酔作用は、CO<sub>2</sub> へ *in-situ* で暴露された後の深海メクラウナギ (hagfish) で観察されている (Tamburri *et al.*, 2000)。
- (2) 高濃度の CO<sub>2</sub> は、初期症状として酸素運搬に急速に影響を及ぼし、その結果、早期の死亡を含む CO<sub>2</sub> の急性影響をもたらす。CO<sub>2</sub> への感受性は、無脊椎動物の中でも、特にイカ類のように非常に複雑で高機能な生物において最も高いと考えられる (Pörtner *et al.*, 2004)。
- (3) 急性の CO<sub>2</sub> 暴露は血液の酸性化の原因となり、鰓 (えら) での酸素の摂取と結合を阻害して、血液運搬される酸素量を減少させるなど、機能を制限し、高濃度においては死に至る。また、高濃度の CO<sub>2</sub> は、代謝機能に必要な酸素量の運搬を阻害するため、動物が窒息状態 (仮死状態: asphyxiate) となることがある。
- (4) 外洋の最も活動的なイカ (*Illex illecebrosus*: カナダイレックス) では、モデルを用いた計算によると、*p*CO<sub>2</sub> が 6,500ppm まで上昇し、血中の pH が 0.25 低下した場合に急性致死影響が予想されている。
- (5) 魚類 (硬骨魚) は、比較的低い代謝率、酸素を輸送する (ヘモグロビンを含む) 赤血球の存在、静脈血酸素備蓄の存在、より丈夫な上皮、効率の良い酸塩基調節などのため、イカ類などの無脊椎動物よりも CO<sub>2</sub> 濃度上昇に耐性があると考えられる。実験においては、対象となった浅海魚類の多くが、成魚の短期致死限界濃度が *p*CO<sub>2</sub>: 50,000 ~ 70,000 ppm と、CO<sub>2</sub> 上昇に比較的高い耐性を示した。また、魚類が致死に至った全てのケースで、直接的な原因は、他の pH 関連作用ではなく、CO<sub>2</sub> の体内侵入であると考えられている。
- (6) 魚類は高感度の CO<sub>2</sub> レセプターを有するため、高濃度の CO<sub>2</sub> 暴露との接触を避けることができる (Yamashita *et al.*, 1989)。しかし、すべての動物が低 pH と高濃度の CO<sub>2</sub> を避けるわけではなく、CO<sub>2</sub> が高濃度であっても餌の匂いのする海域に自ら泳ぎ入る可能性もあるだろう (例えば餌; Tamburri *et al.*, 2000)。
- (7) 空気呼吸の海洋生物 (哺乳類、ウミガメ) は、体液中の *p*CO<sub>2</sub> 値が水中呼吸生物よりも高く、潜水中に行われるガス交換は最小限である。そのため、これらの生物に対する溶解 CO<sub>2</sub> の直接的影響はわずかであると考えられる。しかしながら、CO<sub>2</sub> の食物連鎖に対する潜在的な影響を通じて、間接的に影響を受ける可能性が考えられる。

### 2.4 長期的影響

- (1) 繁殖周期や個体の寿命を超える長期的影響は見落とされがちだが、これらが生態系に大きな変化をもたらす可能性がある (IPCC 特別報告書, p.301)。
- (2) 例えば CO<sub>2</sub> 濃度上昇の長期的影響は、成体よりも初期発育段階でより著しい。また、数ヶ

月を超える長期の生理機能の低下は、個体群における死亡率の上昇につながる可能性がある ( Shirayama and Thornton, 2002、Langenbuch and Pörtner, 2004 )。生態系の動態、構造、及び、機能の将来的変化の予測には、生物の生涯にわたる垂致死影響を示すデータが必要である。

( 3 ) 石灰質の外骨格を持つ動物にとって、恒常的な CO<sub>2</sub> 暴露は、石灰化の阻害や骨格の溶解などの物理的影響を生じさせる可能性があり、海洋表層に生息する石灰化生物の長期間にわたる高濃度 CO<sub>2</sub> に対する感受性については、多数の研究がなされている ( Gattuso *et al.*, 1999, Reynaud *et al.*, 2003, Feeley *et al.*, 2004 など )。それによると、少なくとも十数例のサンゴ及びサンゴモ ( coralline algae ) に関する実験及び野外調査により、産業化以前と比較して二倍の CO<sub>2</sub> 濃度 ( 560ppmv まで ) の上昇に伴って石灰化率の 15% ~ 85% の減少が示唆されている。また、Shirayama and Thornton (2002) は、CO<sub>2</sub> 溶解レベルが 560ppm まで上昇すると、殻を持つ動物 ( 棘皮動物、腹足類 ) の成長率及び生存率が低下することを示した。

( 4 ) 石灰化阻害の他、海水中の CO<sub>2</sub> 濃度の長期的影響として、体内各部において酸塩基調節が阻害されることに起因する、様々な代謝機能に対する影響が挙げられる( 詳細は図 1 参照 )。

#### pH の低下によるもの

酵素及びイオン運搬体の活動が阻害され、多くの代謝機能に影響を与える( Heiser, 1986 他 )

酸塩基に影響を受けるイオン運搬体は、必要な対イオンを摂取するために浸透調節を阻害し、その結果、NaCl を付加的に取り込むこととなる ( 海洋魚類において 10% 未満の付加 ) (Evans, 1984; Ishimatsu *et al.*, 2004)

長期にわたるイオン平衡の阻害は魚類の死亡率の増加へつながることがある

タンパク質合成の阻害、またそれによる成長抑制及び生殖に対する有害な影響繁殖に及ぼす悪影響 ;

- ・ カイアシ類の産卵数と卵の孵化率は pH7.0 で顕著に低下 ( Kurihara *et al.*, 2004。成体では最高 10,000ppm の  $p\text{CO}_2$  に 8 日間暴露しても生存率には影響なし )
- ・ 実験した 2 種のウニ類のいずれでも、受精率は  $p\text{CO}_2$  が 1,000ppm を超えて上昇するに伴って低下 ( pH7.6 以下の水の場合、Kurihara *et al.*, 2004 )
- ・ 魚類卵稚仔の孵化率と生存率も、すべての実験種において水の  $p\text{CO}_2$  と暴露時間に伴って低下 ( Ishimatsu *et al.*, 2004 )

#### CO<sub>2</sub> 自体が体内へ侵入することによるもの

酸性血症の代償作用が不完全であることによる、有酸素エネルギー代謝の低下 (Pörtner *et al.* 2004, 2005)

高  $p\text{CO}_2$  の環境下においては、アデノシンが神経組織に蓄積することにより呼吸機能が低下( スジホシムシ *Sipunculus nudus*; 星口動物門では 10,000ppm 以下 )( Lutz and Nilsson, 1997 )

### 3 . 生理学的機構からの生態系影響 [ IPCC 特別報告書 6.7.3 ]

( 1 ) CO<sub>2</sub> は、分子レベルから細胞や組織経由で生物の体内および生態系全体へと影響を広げる



(図1、表2)。しかしながら、生理学的機構の知見だけでは生態系レベルの影響を完全に評価することは不可能である(IPCC 特別報告書,p.301)。

- (2) 多くの種は、一時的な CO<sub>2</sub> 濃度の変動には耐えられても、CO<sub>2</sub> レベルが恒常的に高くなっている海域において定住及び繁殖することはできないだろう。また、急性致死レベルより低い CO<sub>2</sub> 濃度においても、成長抑制及び生殖能力の低下、病気への抵抗力の低下などの高度な機能の退化が生じることがある (Burnett, 1997)。
- (3) 攻撃や逃避能力が低下し、食物供給にも影響が出る可能性があり、生態系全体の適応度にも影響を及ぼすだろう。
- (4) 種ごとの CO<sub>2</sub> に対する感受性及び影響を受ける機構の研究が、海洋化学的性質の変化に対する生態系全体の反応の原因と結果の理解を深める手がかりとなるが、生態系に対する影響を対象とした野外調査により補完される必要がある。

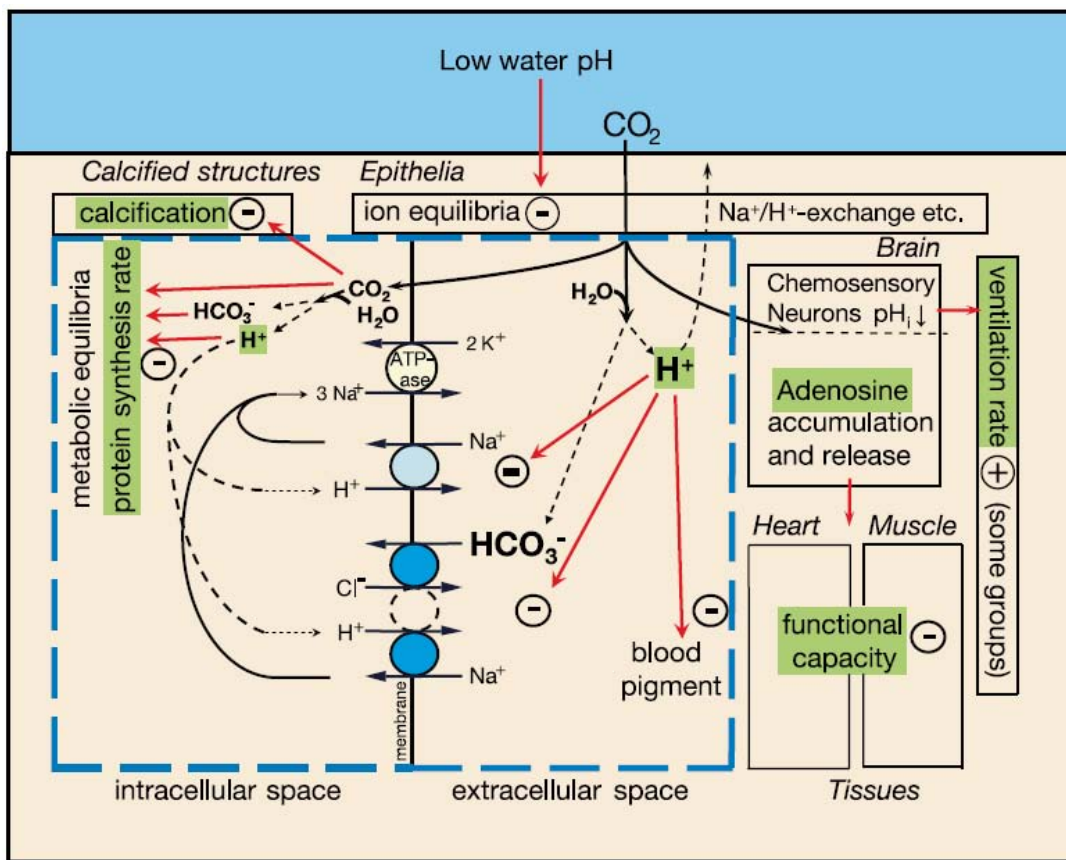


図1 一般化及び単純化された海洋無脊椎動物または魚類における、付加的 CO<sub>2</sub> の生物の分子規模での影響、またそれに伴う水素イオン (H<sup>+</sup>)、重炭酸塩 (HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)、炭酸基 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) レベルの変化。図上部の青い部分は開放水域を、黄褐色の部分は生物を表す。一般化された細胞過程は左に表示され、脳、心臓、筋肉など様々な組織で生じる。そして、これらの過程の阻害による影響が右欄と上部に表示されている。CO<sub>2</sub> による負荷により、成長、行動、繁殖などの動物の活動全体が抑制される (Pörtner *et al.*, 2005 より作成。「-」と「+」は各機能の減退と増進を表す。) 黒い矢印は CO<sub>2</sub> の各部分間の拡散による動き、赤い矢印は CO<sub>2</sub>、H<sup>+</sup>、HCO<sub>3</sub> などの機能を調節するのに有効な要素を表す。網がけ部分 (緑色) は成長やエネルギー収支に関する過程を表す。

**表2** CO<sub>2</sub>の影響を受ける生理学的・生態学的作用（リストに挙げられた植物性プランクトンへの影響は深海の場合は関係がないが、大規模なCO<sub>2</sub>の混合の間には影響が生じる可能性もある）(Heisler, 1986, Wheatly and Henry, 1992, Claiborne *et al.*, 2002, Langdon *et al.*, 2003, Shirayama and Thornton, 2002, Kurihara *et al.*, 2004, Ishimatsu *et al.*, 2004, 2005, Pörtner *et al.* 2004, 2005, Riebesell, 2004, Feeley *et al.*, 2004 及び文中の文献による検討に基づく)。

影響を受ける作用	実験生物
石灰化 ( Calcification )	<ul style="list-style-type: none"> <li>サンゴ</li> <li>石灰質 ( の骨格を有する ) 底生生物及びプランクトン</li> </ul>
酸塩基調節 ( Acid-base regulation )	<ul style="list-style-type: none"> <li>魚類</li> <li>スジホシムシ</li> <li>甲殻類</li> </ul>
死亡率 (Mortality)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ホタテガイ</li> <li>魚類</li> <li>カイアシ</li> <li>棘皮動物/腹足類</li> <li>スジホシムシ</li> </ul>
窒素代謝 (N-metabolism)	<ul style="list-style-type: none"> <li>スジホシムシ</li> </ul>
タンパク質生合成 (Protein biosynthesis)	<ul style="list-style-type: none"> <li>魚類</li> <li>スジホシムシ</li> <li>甲殻類</li> </ul>
イオン恒常性 (Ion homeostasis)	<ul style="list-style-type: none"> <li>魚類、甲殻類</li> <li>スジホシムシ</li> </ul>
成長 ( Growth )	<ul style="list-style-type: none"> <li>甲殻類</li> <li>ホタテガイ</li> <li>イガイ</li> <li>魚類</li> <li>棘皮動物/腹足類</li> </ul>
繁殖成績(Reproductive performance)	<ul style="list-style-type: none"> <li>棘皮動物</li> <li>魚類</li> <li>カイアシ</li> </ul>
心肺機能 ( Cardio-respiratory functions )	<ul style="list-style-type: none"> <li>魚類</li> </ul>
光合成 ( Photosynthesis )	<ul style="list-style-type: none"> <li>植物プランクトン</li> </ul>
成長及び石灰化 ( Growth and calcification )	
生態系構造 ( Ecosystem structure )	
生物地球化学的サイクルに対するフィードバック ( 栄養素の量的関係 ; C:N:P、 溶存有機炭素 ( DOC ) の浸出 )	

#### 4 . CO<sub>2</sub> 流中の汚染物質による影響 [ IPCC 特別報告書 6.7.6 ]

- ( 1 ) CO<sub>2</sub> 流の主要な汚染物質は、H<sub>2</sub>S ( 硫化水素 ) である。
- ( 2 ) 海洋には硫化水素の自然発生源が大量にある。海底の堆積物の多くは無酸素で、大量の硫化物を含んでおり、いくつかの大規模な海盆 ( 黒海、カリアコ海溝など ) は無酸素で硫化物に富んでいる。結果として、硫化物や硫酸化細菌の存在に適応した海洋生態系は、世界中の海洋で一般的なものである。
- ( 3 ) それでもなお、CO<sub>2</sub> 流中の H<sub>2</sub>S の存在は局所的な溶存酸素レベルの低下を招き、高等海洋動物の呼吸器系と活動に影響を与えられられる。