

二酸化炭素海底下地層貯留の生態影響評価について

1. 二酸化炭素漏洩による海洋生物への影響

(1) 海洋中の二酸化炭素濃度

海水中のバックグラウンドの二酸化炭素濃度については、気象庁により冬季における東経 137 度線、北緯 7～33 度の海域で行われた大気中及び海表面の二酸化炭素分圧 (pCO_2) の観測結果から判断すれば、2005 年における我が国の海域とその周辺の海表面における pCO_2 は概ね 340ppm¹程度と考えられる。(ただし、 pCO_2 は水温の他、生物生産の大きな海域や鉛直混合の盛んな海域においては日周変動、季節変動によっても変動する。)

(<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/sougou/html/1.4.html>)

GEOSECS (Geochemical Ocean Sections Study: 地球化学的大洋縦断研究) や、Nakano et al. (2006)²にて観測された pCO_2 の鉛直分布によれば、北太平洋海域の場合、水深 500m では概ね 500ppm 程度、水深 1,000m では概ね 1,000ppm 程度であり、1,000m 以深では水深が大きくなるにつれて pCO_2 が低下する(図 1)。野崎 (1994)³によれば、水深 1,000m 前後で pCO_2 が極大となるのはプランクトン由来の有機物の分解によるところが大きい。

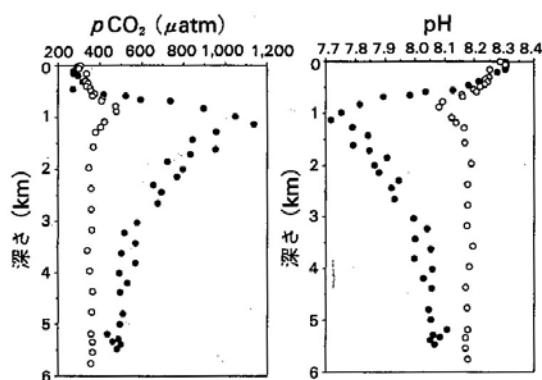


図 1 GEOSECS で観測された北太平洋(○)と北大西洋(●)の pCO_2 と pH の鉛直分布。観測地点は、北太平洋が北緯 30 度 41 分東経 170 度 38 分(測点番号 GEOSECS 226)、北大西洋が北緯 31 度 49 分西経 50 度 53 分(同 GEOSECS 119)。野崎(1994)より

¹ 本資料では、海水中の二酸化炭素分圧について、本来用いられるべき圧力の単位である μatm (百万分の一気圧)を用いず、便宜的に体積比(ppm, 百万分の一)で示した。海水と平衡にした空気中の二酸化炭素体積比と二酸化炭素分圧は、ほぼ等しくなる。

² Nakano, Y., H. Kimoto, S. Watanabe, K. Harada, Y.W. Watanabe.. Simultaneous Vertical Measurements of *In Situ* pH and CO₂ in the Sea Using Spectrophotometric Profilers. J. Oceanogr., 62, 71-81, 2006

(2) 海水中の二酸化炭素濃度の上昇による海洋環境への影響

海底下地層に貯留した二酸化炭素が海洋に漏洩した場合の海洋環境影響については、2005年に発行された二酸化炭素回収・貯留（CCS）についてのIPCC特別報告書（以下「IPCC特別報告書」という。）や、海水中の二酸化炭素濃度を上昇させて行われた生物試験結果では、以下の知見が得られている。

多くの動物は低二酸化炭素濃度の環境に適応しており、高二酸化炭素濃度で極めて高い酸性の水への暴露は急性致死をもたらす。常時上昇した二酸化炭素濃度に生物がどこまで適応できるかは不明であるが、現状の低二酸化炭素濃度の海域で生息する多くの種は、一時的な二酸化炭素濃度の変動には耐えられるが、二酸化炭素濃度が恒常的に高くなる海域においては、生物相が変化すると考えられる。

一般的には、外洋に分布する生物、深海に分布する生物は、沿岸浅海に分布する生物に比べて環境の擾乱に弱く、二酸化炭素濃度の上昇には脆弱である可能性がある。

魚類成魚は、総じて二酸化炭素濃度の上昇に強く、無脊椎動物は弱い傾向がある。また、石灰質の殻を持つ生物には強い影響が生じる可能性があり、高炭酸濃度の伊平屋海凹では底生生物において石灰質の殻を持つ有孔虫が少ない事実も報告されている。

二酸化炭素濃度上昇の影響は、成体よりも初期発育段階でより著しい傾向がみられ、魚類では成魚への影響は小さくとも、卵稚仔で高い死亡率が発生する可能性がある。

急性致死レベルよりも低い濃度においても、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り、特定種の個体密度および生産力の低下、ひいては食物連鎖を通じた生態系レベルでの影響の可能性が示唆される。

(3) 海洋生物に対する二酸化炭素の影響濃度

IPCC特別報告書等によれば、浅海域の成魚については、実験の結果、短期致死限界濃度が pCO_2 で 50,000 ~ 70,000ppm との知見が得られている。これらから、二酸化炭素濃度上昇に比較的高い耐性を示すと考えられる。また、空気呼吸する生物（海生哺乳類、ウミガメ）は、体液中の pCO_2 が水中呼吸生物よりも高く、

³ 野崎義行..地球温暖化と海. 東京大学出版会, 1994

潜水中に行われるガス交換は最小限であることから、二酸化炭素の濃度上昇による直接的影響はわずかであることが示されている。一方、イカ (*Illex illecebrosus* : カナダイレックス) ではモデル計算により、海水中の $p\text{CO}_2$ が 6,500ppm まで上昇した場合に急性致死影響が予想されること、卵や稚仔、若齢個体の場合には、表 1 に見られるように、成魚や成体に比べるとやや低い二酸化炭素濃度で影響が生じることが知られている。

表 1 魚類と無脊椎動物の CO_2 急性影響 (LC_{50} :24 時間半数致死濃度)

Test species	24h LC_{50} ($p\text{CO}_2$ ppm)
<u>Fish</u>	
<i>Pagrus major</i> (Eggs, Larvae, Juveniles)	13,300 – 52,700
<i>Sillago japonica</i> (Larvae, Juveniles)	26,300 – 48,200
<i>Paralichthys olivaceus</i> (Eggs, Juveniles)	28,400 – 50,000
<i>Euthynnus affinis</i> (Eggs)	94,300
<u>Cephalopod</u>	
<i>Sepia lycidas</i> (Juveniles)	83,700
<i>Sepioteuthis lessoniana</i> (Juveniles)	58,700
<u>Decapod</u>	
<i>Penaeus japonicaus</i> (Juveniles)	> 150,000
<u>Copepoda</u>	
Subarctic shallow species	15,000 (mean value)
Subarctic deep species	Could not determine, Highly tolerant
Subtropical shallow species	53,000 (mean value)
Subtropical deep species	86,000 (mean value)

喜田ら (2006)⁴

Hayashi *et al.*(2004)⁵はヒラメ(体重 $490 \pm 40\text{g}$)を用いて、Kikkawa *et al.*(2004)⁶はマダイ卵・稚仔を用いて、二酸化炭素濃度の上昇による pH 低下の影響と、硫酸または塩酸の添加による pH 低下の影響の比較試験を行っている。これらによれば、pH の低下が同じであっても、二酸化炭素による急性影響は酸による影響に比べて強く現れることが示されている。また、Kikkawa *et al.*(2006)⁷がシロギス稚魚で行った試験によれば、二酸化炭素濃度を段階的に増加させた場合には、

⁴ 喜田 潤、渡辺雄二、白山義久、吉川貴志、林 正裕、石松 惇、生物個体への影響は？ (急性影響について) 海洋学会シンポジウム「二酸化炭素海洋隔離：適切な環境影響評価のあり方について」、2006

⁵ Hayashi, M., J. Kita, A. Ishimatsu.. Comparison of the acid-base responses to CO_2 and acidification in Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*). Mar. Pollut. Bull., 49, 1062-1065, 2004.

⁶ Kikkawa, T., J. Kita, A. Ishimatsu.. Comparison of the lethal effect of CO_2 and acidification on red sea bream(*Pagrus major*). Mar. Pollut. Bull., 48, 108-110, 2004.

⁷ Kikkawa, T., T. Sato, J. Kita, A. Ishimatsu.. Acute toxicity of temporally varying seawater CO_2 conditions on juveniles of Japanese sillago (*Sillago japonica*). Mar. Pollut. Bull., 52, 621-625, 2006.

死亡率が小さくなる現象が見られている。

IPCC 特別報告書によれば、二酸化炭素濃度上昇が長期にわたる場合の影響についても指摘されている。特に、石灰質の殻を持つ動物にとって、恒常的な二酸化炭素暴露は、石灰化の阻害や骨格の溶解などの物理的影響が生じる可能性がある。少なくとも十数例のサンゴ及びサンゴモ (coralline algae) に関する実験及びフィールド調査により、産業化以前と比較して二倍の二酸化炭素濃度 (560ppm まで) の上昇に伴う石灰化率の 15% ~ 85% の減少が示唆されている。また、 $p\text{CO}_2$ が 560ppm まで上昇すると ($p\text{CO}_2$ の変化量 ($p\text{CO}_2$) が 200ppm まで上昇すると)⁸、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す研究結果もある。

石灰化阻害の他、海水中の二酸化炭素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。例えば、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した ($p\text{H}7.6$ 以下の水の場合)。

Kurihara et al.(2004)⁹がカイアシ類(*Acartia erythraea*)を $p\text{CO}_2$ 365ppm (対照区)、5,365ppm (+5,000ppm 区) および 10,365ppm (+10,000ppm 区) で 8 日間飼育した試験では、生残率には各区で有意差が認められなかった。一方、卵産出数や孵化率は +5,000ppm 区では有意な低下が認められなかったものの、+10,000ppm 区では有意な低下が認められた。

喜田ら (前出) は、Watanabe et al.(2006)¹⁰が行った中深層カイアシ類の急性影響実験データを用いて、Mayer et al.(1994)の方法により影響が生じないとする推定濃度を $p\text{CO}_2$ で 4,900ppm としている。喜田らは、この結果と前述の卵産出数と孵化率の実験結果をあわせて、海水中の二酸化炭素増加によっても影響が生じないであろうとする推定濃度を $p\text{CO}_2$ で 5,000ppm とした。また、異な

⁸ IPCC 特別報告書に引用された生物試験に関する論文 (Shirayama and Thornton, 2005) では、実験方法を "with air to which an additional 200 ppm of CO_2 was added" としており、 $p\text{CO}_2$ で 200ppm とする方が適切とも考えられる。

⁹ Kurihara, H., S. Shimode and Y. Shirayama.. Effects of raised CO_2 concentration on the egg production rate and early development of two marine copepods (*Acartia steueri* and *Acartia erythraea*). Mar. Pollut. Bull., 49, 721-727, 2004.

¹⁰ Watanabe, Y., A. Yamaguchi, H. Ishida, T. Harimoto, S. Suzuki, Y. Sekido, T. Ikeda, Y. Shirayama, M.M. Takahashi, T. Ohsumi and J. Ishizaka.. Lethality of increasing CO_2 levels on deep-sea copepods in the western North Pacific. J. Oceanogr., 62, 185-196, 2006

るエンドポイント¹¹による生態影響試験結果が得られていることを勘案して設定した安全率を考慮した場合の無影響レベルを pCO_2 で 500ppm としている。

カイアシ類等の動物プランクトンは、魚介類の初期成育段階及びイワシ類に代表されるプランクトン食性魚類等の重要な餌生物であること、ならびに昼夜の深浅移動に伴う有機物(エネルギー)の鉛直的な移動において重要な役割を果たす種もある。したがって、動物プランクトンに対する著しい影響が生じる場合には、(局所的であっても、)生態系に大きな変化を引き起こす可能性があることに留意する必要がある。

まだ海洋生態影響に関する確実な情報は少ないが、これらを総合すると、二酸化炭素濃度の上昇による海洋生物への影響が認められた最小濃度については、石灰質の殻を持つ動物の試験結果からは pCO_2 で 200ppm (IPCC 特別報告書の記述に基づけば pCO_2 で 560ppm) であった。また、動物プランクトンでの試験結果からは、無影響と想定される濃度は pCO_2 で 500ppm と考えることもできる。ただし、地域、水深、季節などによってバックグラウンドの観測値がこれらの値を上回ることも珍しくない。従って、これらの値を超えたから直ちに何らかの影響があると考えのではなく、問題となる現場の pCO_2 の変動や生物相等を考慮し、具体的に環境影響を検討する必要がある。

IPCC 特別報告書の政策決定者向け要約(以下「IPCC 特別報告書要約」という。)によれば、「適切に選択され管理された地中貯留サイトに二酸化炭素が留まる割合は、100年後に99%以上である確率は90~99%(very likely)であり、1000年後に99%以上である確率は66~90%(likely)である。」とされている。従って、二酸化炭素海底下地層貯留において適切な場所の選定と管理が行われれば、二酸化炭素が海洋に漏洩する可能性は非常に小さいと想定されるが、海洋に漏洩した場合における生物の慢性影響の評価も重要な課題である。海洋生物に関する慢性影響評価については、現時点では国際機関で承認された試験手法がないが、長期にわたる影響に関する科学的知見を収集し、許可申請時に最新の知見をもとに影響評価を行う必要がある。

なお、(1)に示したとおり、 pCO_2 は水深 1,000m までは元々漸増することが知られていることから、海底下地層における二酸化炭素の貯留事業においては、漏洩が想定される水深を勘案しつつ、影響評価を検討する必要がある。

¹¹ エンドポイントとは、化学物質等による生体影響の明確な影響指標を指す。具体的には、死亡、催奇形性、発がん性、生長又は成長阻害、増殖又は繁殖阻害、行動異常などがあげられる。

2. 二酸化炭素の海底漏洩後の挙動に関するシミュレーションの一例

二酸化炭素海底下地層貯留に関し、海底から漏洩した後の挙動については、(財)地球環境産業技術研究機構(2006)¹²(以下、「RITE」という。)により数値シミュレーションが行われている。

(1) 地層中の二酸化炭素流の挙動シナリオ

本シミュレーションでは、RITE(2004)¹³が実施した地層シミュレーションの結果が採用されている。本地層シミュレーションにおける貯留地点、貯留量等に関する仮定は以下のとおりである。

- 二酸化炭素流の貯留層は日本近海に存在すると推定されている水深100m前後、海底下深度1,000m前後のドーム状の背斜構造を持つ帯水層。
- 100万kw級の火力発電所から二酸化炭素を回収し、20年間で約7,300万トンの二酸化炭素を貯留層に圧入。

本地層シミュレーションでは、通常想定される以上の規模の大地震が発生したとしても起こるとは考えにくい、以下の極端な漏洩シナリオが仮定されている。¹⁴

- 二酸化炭素流の仮想移行経路としては、貯留した帯水層と海底の間に上部帯水層が存在、大地震により断層が発生し、断層破碎帯が貯留帯水層から上部帯水層を貫通し、最短距離で海底に達する極端なケース

¹² (財)地球環境産業技術研究機構、二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書、平成18年3月、p1722-1749

¹³ (財)地球環境産業技術研究機構、二酸化炭素地中貯留技術研究開発成果報告書、平成16年3月、p158-212

¹⁴ 実際の二酸化炭素貯留事業を考えると、断層は海底下に貯留された二酸化炭素の地表への主要な漏洩パスになりうるので、貯留地点の選定段階で、このような巨大な断層が存在する場所は、サイト選定の中で評価され、漏洩の経路となると判断されれば避けることになる想定される。海域では、地下構造を調査するため、地震波反射法による調査を行うことが想定されるが、断層があれば、反射記録に地下の地層の食い違いが反射面の食い違いとして現れるため、既存断層を見落とすことはまずないと考えられる。

したがって、本シミュレーションで仮定されたような事象は、地震の発生に伴って新たな断層が生じ、その断層に沿って、二酸化炭素が地表に漏洩するというシナリオになると考えられる。地震の発生は、東海地震のような海溝に沿ったプレート境界地震とそれ以外のプレート内部での活断層による地震があり、同じ場所に繰り返し地震が発生することが知られている。小規模の断層のみが存在する場所に、今後1000年程度の時間範囲に新たに巨大な断層が生じるとはまず起こらないと考えられる。

を設定。また、断層の傾きは浮力が最も大きくなり二酸化炭素の上部移行が最も早くなると想定される垂直方向を設定。

- 断層破碎帯の幅（厚さ）は 25m に設定（地層モデルのグリッドの最小サイズが 25m という点を考慮したもの。なお、断層破碎帯の幅は最大でも 15m 程度と言われている）。
- 仮想移行経路での垂直方向の浸透率を、地表面近傍での浸透率を参考に 1md(ミルダール)及び 10md と設定。また、水平方向浸透率は 200md に設定。

なお、岩盤の浸透率は深度とともに減少する深度依存性を示すことが一般に知られている。このため、深部地層であれば、地表面の数値よりも小さな浸透率を持つが、この極端ケースでは、地表面近傍の浸透率を参考に、一定として計算されている。

以上の条件で地層シミュレーションを行った鉛直方向浸透率 1md という数値の設定は、具体的には、1000 年後までに、貯留された二酸化炭素のうち約 80% もの二酸化炭素が海水中に漏洩するという極端なケースであり、さらに、10md という数値の設定は、200 年後までに同じ量の二酸化炭素が漏洩するという非常に極端なケースを表したものである。（いずれのケースにおいても、残りの約 20% は上部帯水層に残留する。）

1（3）で示したとおり、IPCC 特別報告書要約では、適切な場所の選定と管理の重要性が述べられており、本シミュレーションで想定した漏洩量は、IPCC 特別報告書要約で評価されたレベルと比べて極めて大きいものを想定したことになる。

なお、RITE が新潟県長岡で実施している二酸化炭素地中貯留の実証実験において、二酸化炭素の地下帯水層への圧入中の 2004 年 10 月に、新潟県中部地震（本震：M6.8、最大震度 7）が発生したが、貯留された二酸化炭素流（当時：約 8,950CO₂トン）は、地震後も想定範囲内に貯留されていたことが確認されている。

（2）海底下からの漏洩シナリオ

漏洩量

RITE(2006)では、上記 2（1）の RITE(2004)の地層シミュレーションの結果から得られた二酸化炭素の漏洩速度から、漏洩量は漏洩率 1md の場合には

0.4(10⁻⁴kg/m²/s)、10md の場合には 2.8(10⁻⁴kg/m²/s)と仮定されている。

海流速度

漏洩した海底周辺の海流速度については、0.05m/s、0.1m/s の2ケースが仮定されている。

漏洩する海底の水深、及び二酸化炭素の気泡（液滴）径

漏洩する地点の水深は、200m 及び 500m の2ケースが仮定されている。

- 二酸化炭素海底下地層貯留の実施コストは、二酸化炭素の分離・回収地点から圧入地点までの距離に比例する。我が国においては、経済性等の観点から、海底下への地層貯留のほとんどは、沿岸の陸棚直下で、陸地に近くかつ陸棚斜面から遠い水深 200m 以浅の海底下に貯留されると考えられる。
- 水深 200m 以深のケースとして考えうるシナリオは、陸棚の斜面下から漏洩する場合であり、この場合も漏出地点は陸地からの距離は比較的近いと想定され、漏洩地点の水深は、500m 程度と考えられる。¹⁵

漏洩直後の二酸化炭素の径については、気泡径として 0.01m と仮定され、その気泡径と同質量の液滴の径として 0.0036m と仮定されている。また、気泡径については2ケース（0.01m、0.02m）と仮定されている。

- 漏洩する二酸化炭素の性状は、海底付近の温度と水圧で決定される。通常、水深 500m 以深では、漏洩直後の二酸化炭素は液滴状であり、その後上昇し気泡に変化する。200m と 500m の中間では液滴と気泡が混在していると想定される。また、水深 200m では漏洩直後の二酸化炭素は気泡であると想定される。

各シナリオのまとめ

RITE(2006)では、上記の仮定を組合せ、以下のケースが設定されている。

	単位時間当たりの CO ₂ 漏洩量 (10 ⁻⁴ kg/m ² /s)	海流速度 (m/s)	漏洩直後の気泡（液滴）径 (m)	漏洩地点の水深 (m)
ケース 1	0.4	0.05	0.01	200
ケース 2	0.4	0.1	0.01	200
ケース 3	0.4	0.05	0.02	200
ケース 4	2.8	0.05	0.02	200
ケース 5	0.4	0.05	0.0036	500

¹⁵ 我が国では、貯留地点の海底が水深 500m 以深のケースは当面想定されていない。

(3) シミュレーションに基づく生態系影響評価の結果

RITE(2006)の数値シミュレーションの結果の解釈では、評価の判断基準として $p\text{CO}_2$ を用いている。シミュレーションによる計算結果は、以下のとおりとされている(図2)。

- 二酸化炭素の単位時間当たりの漏洩量その他、温度、圧力など、海水の物性等によって挙動が変化した。
- 計算が行われた5つのケースいずれにおいても、二酸化炭素の漏洩に伴う $p\text{CO}_2$ (ppm) は漏洩地点付近の水深で最も高く、表層に向かうに従い減少した。
- 単位時間当たりの漏洩量が多いと仮定したケースの方が、少ないケースよりも $p\text{CO}_2$ が高かった。
- 漏洩する二酸化炭素の気泡(液滴)径が小さいと仮定したケースの方が、 $p\text{CO}_2$ が高かった。
- 水深500mの海底で漏洩すると仮定したケースでは、水深200mの海底で漏洩すると仮定したケースよりも $p\text{CO}_2$ が高かった。(この結果は、海底付近での漏洩した二酸化炭素の物性の違い(水深500mでは液滴状、水深200mでは気泡状と仮定)が影響していると推定される。)
- 浸透率10mdで漏洩地点の水深を200mと仮定したケース4、及び漏洩地点の水深を500mとし、液滴で漏洩すると仮定したケース5で、海底付近において $p\text{CO}_2$ が500ppmを超えた。他方、ケース1からケース3の3つのケース(水深200mの地点での漏洩を仮定)においては、すべて $p\text{CO}_2$ は500ppmを超過しなかった。
- 表層付近では、いずれのケースも $p\text{CO}_2$ は漏洩地点と比較して大幅に減少した。

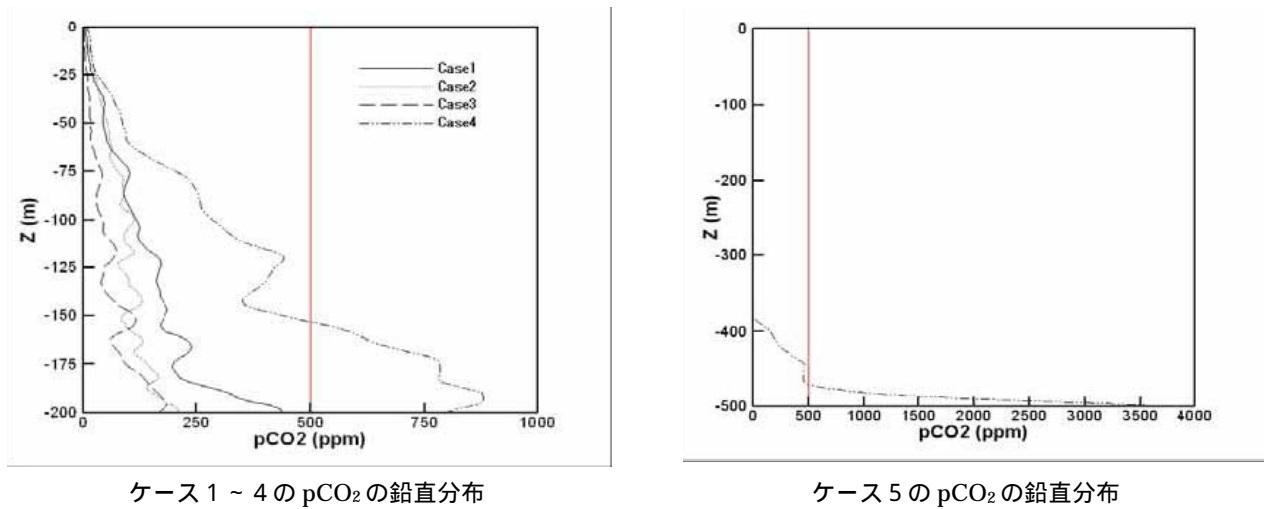


図 2 pCO₂ の鉛直分布の計算結果

3. 総合的な評価

IPCC 特別報告書の政策決定者向け要約によれば、「適切に選択され管理された地中貯留サイトに二酸化炭素が留まる割合は、100 年後に 99%以上である確率は 90~99%(very likely)であり、1000 年後に 99%以上である確率は 66~90% (likely)である。」とされており、適切な場所の選定と管理の重要性が述べられている。

これに対して上記 2. で示したケーススタディは、200 年及び 1000 年の間に貯留量の 80%が漏洩するという、通常想定される以上の規模の大地震が発生したとしても起こるとは考えにくい、極端な二酸化炭素漏洩シナリオでシミュレーションを行ったものである。この計算結果からは、水深 200m の漏洩地点では 10²ppm オーダーで、水深 500m の漏洩地点では 10²~10³ppm オーダーで pCO₂ が増加するとされている。

しかしながら、上記の IPCC 特別報告書の政策決定者向け要約が示すとおり、適切に選択され管理された地中貯留サイトであれば、今回引用した極端な漏洩は起こりにくいと想定される。

ただし、今回のシミュレーションにおけるパラメータの設定は、一定の仮定を通して行われたものであり、海水の物性（特に pCO₂）は、水深や水温等の要因

によっても変化する。また、漏洩地点の水深が上記 2 . のケース以外の場合もある。従って、実際の影響評価を行う際には、個別のケースごとに、可能な限り貯留地点における特性に応じてパラメータを設定する必要がある。

このように、影響評価を行う手法(シミュレーションを含む)は存在しており、このため、許可発給の際に潜在的影響の評価を行うことは可能である。

なお、海底下に貯留された二酸化炭素流に含まれる有害物質については、海洋環境への影響を防止する観点から適切なレベルに管理される必要があることから、圧入可能な二酸化炭素流について、その物理的、化学的特性を管理する必要がある。

二酸化炭素流が海底から漏洩する場合、当該二酸化炭素流中の有害物質は地層中の海水により希釈されたり、海底下地層にて有害物質がトラップされたりする可能性がある一方、海底地層中に元々存在していた有害物質を取りこみながら(随伴しながら)上昇して漏洩する可能性も否定できない。しかしながら、これらの事象は個々の貯留場所と漏洩経路の地質等に強く依存すると考えられることから、事前に網羅的に把握することは困難である。このため、海洋環境への影響の可能性について把握するためには、注入後においても海水の pCO_2 、pH 等のモニタリングを行い、環境の変化を把握する必要がある。これらのデータやシミュレーション結果等を勘案し、最新の科学的知見も踏まえ、個別のケース毎に検討することが適切である。