

注：上が気相のフラックス，下が溶存態のフラックス。右は積算漏出量。赤矢印で示した極大値がシナリオ2ケースで与えた漏出フラックス。

第4.2-1図 シナリオ2 萌別層ケースのシミュレーション結果

4) 貯留量の1%が漏出するケース（1%漏出ケース）

CO₂の貯留予定量（60万トン）の1%が1年で漏出する場合を想定し，0.190kg/s（=6,000トン/年）の気相CO₂フラックスと4.611×10⁻³kg/sの溶存CO₂フラックスを与えた。

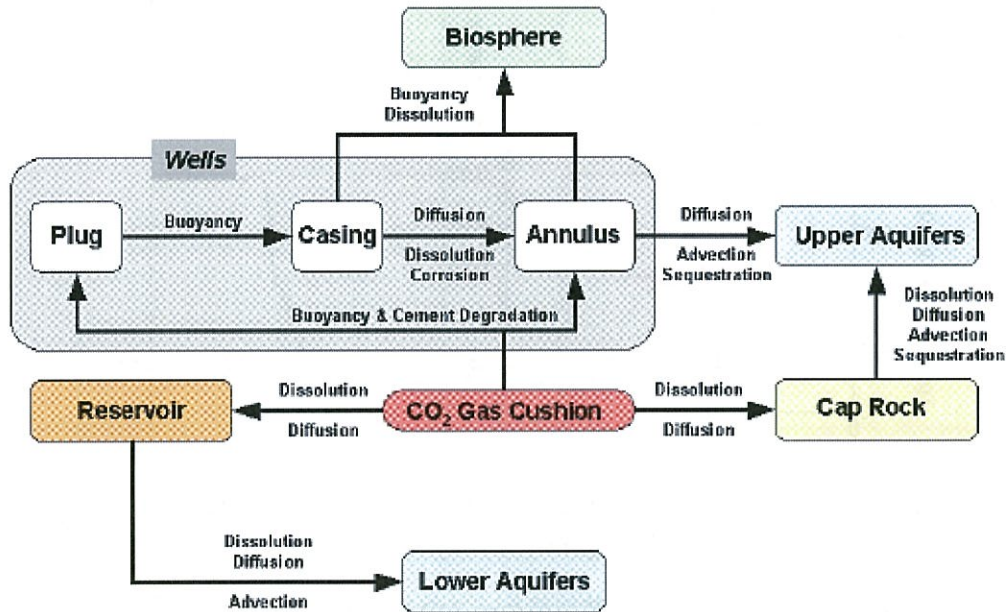
貯留量の1%が漏出するという想定は，気候変動に関する政府間パネル（以下，IPCCと称する）の検討に基づいている^[1]。IPCCはCO₂の漏出に関していくつかのシミュレーション結果に基づいて検討を実施した。そのなかで，Walton et al.（2004）^[2]やZhou et al.（2004）^[3]による移行挙動シミュレーションに基づき，貯留層からCO₂が何らかの事象で漏出，拡散する量は最大で圧入量（総量）の1%以下と設定している。

[1] Benson, S., Cook, P., Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H.B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., Gale, J., von Goerne, G., Heidug, W., Holloway, S., Kamal, R., Keith, D., Lloyd, P., Rocha, P., Senior, B., Thomson, J., Torp, T., Wildenborg, T., Wilson, M., Zarlenga, F., and Zhou, D., 2005. Underground geological storage. In: Metz, B. et al. (Eds), IPCC Special Report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp.195-276.

[2] Walton, F.B., Tait, J.C., LeNeveu, D., and Sheppard, M.I., 2004. Geological storage of CO₂: A statistical approach to assessing performance and risk. In: Rubin, E.S. et al. (Eds), Proceedings of 7 the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I., pp.693-700.

[3] Zhou, W., Stenhouse, M.J., Arthur, R., Whittaker, S., Law, D.H.-S., Chalaturnyk, R., and Jazrawi, W., 2004. The IEA Weyburn CO₂ Monitoring and storage project - modeling of the long-term migration of CO₂ from Weyburn. In: Rubin, E.S. et al. (Eds), Proceedings of 7 the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I., pp.721-730.

Walton et al. (2004)^[1]は、貯留層へ圧入した超臨界CO₂が遮蔽層へ溶解、拡散もしくは坑井から漏出して生物圏、地圏（地中）、貯留層の中を移動する割合（マスバランスの変化）を統計的に計算し、特に生物圏へ移動するCO₂を漏出と認定した（第4.2-2図）。

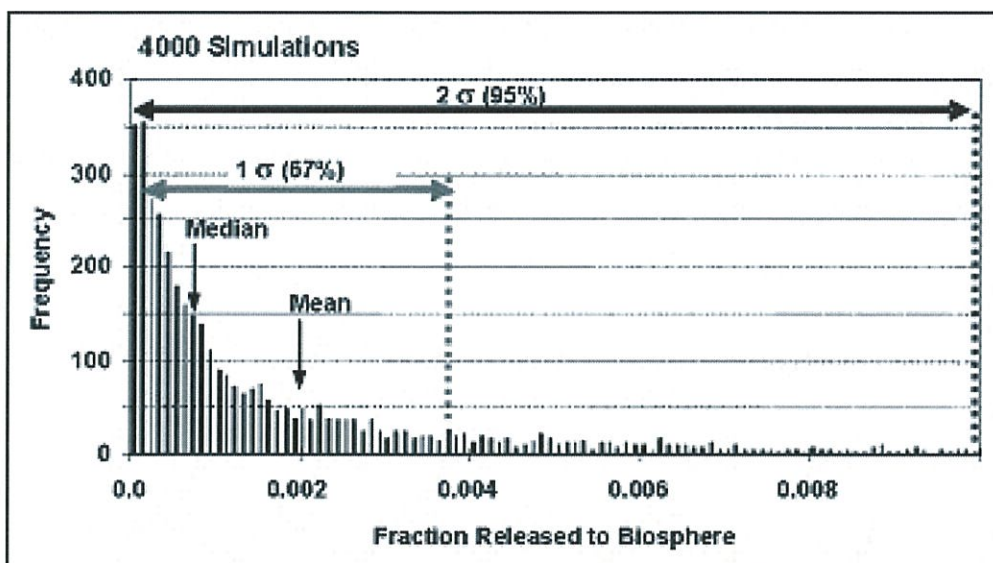


注：出典：Walton et al. (2004)^[1]

第4.2-2図 貯留層からのCO₂の漏出経路

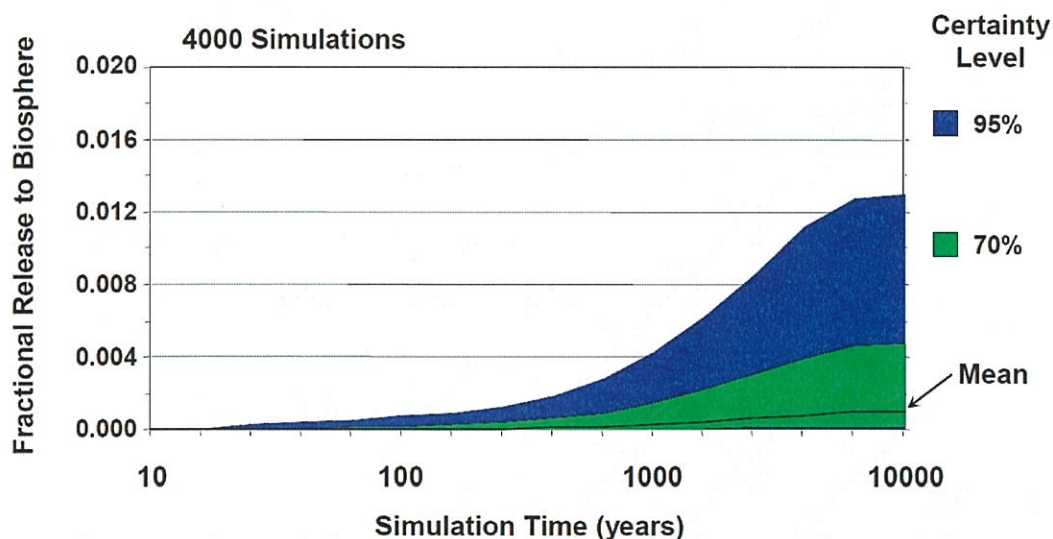
結果として、4,000 ケースの計算を実施した上で標準偏差の2 σ （全体の95%）は生物圏への漏出割合が0.012となることを示し（第4.2-3図）、圧入後8,000年から10,000年後に坑井などを通じて生物圏へ漏出するCO₂の量は、最大でも圧入量の1.2%であることを示唆した（第4.2-4図）。

^[1] Walton, F.B., Tait, J.C., LeNeveu, D., and Sheppard, M.I., 2004. Geological storage of CO₂: A statistical approach to assessing performance and risk. In: Rubin, E.S. et al. (Eds), Proceedings of 7 the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I., pp.693-700.



注：出典：Walton et al. (2004)^[1]

第 4. 2-3 図 生物圏への漏出量



注：出典：Walton et al. (2004)^[1]

第 4. 2-4 図 生物圏への圧入後から 10,000 年後の漏出量

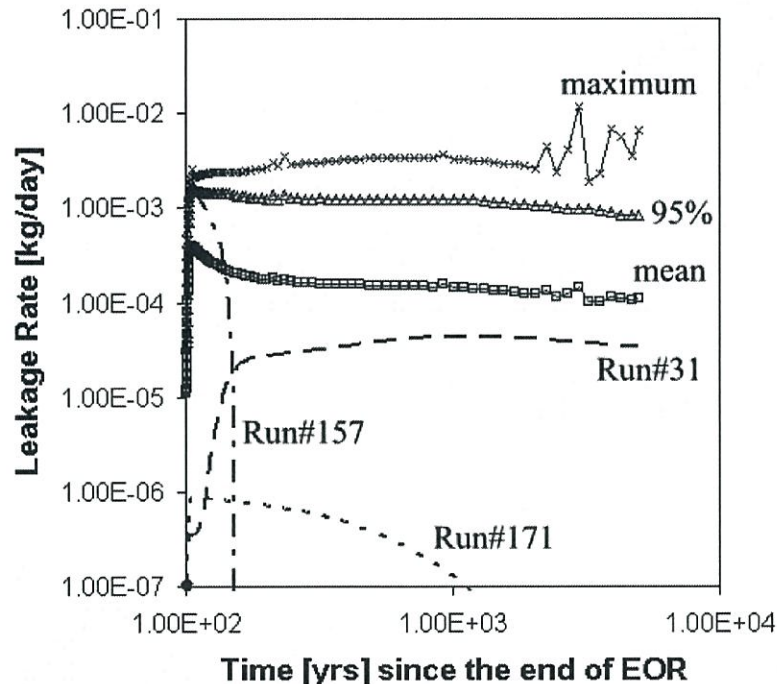
また、Zhou et al. (2004)^[2]も貯留層から生物圏へのCO₂の漏出を課題とし、貯留層に達している坑井のプラグやアニュラスを通じてCO₂が漏出する場合を想定して漏出レート（フ

^[1] Walton, F.B., Tait, J.C., LeNeveu, D., and Sheppard, M.I., 2004. Geological storage of CO₂: A statistical approach to assessing performance and risk. In Rubin, E.S. et al. (Eds), Proceedings of 7 the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I., pp.693-700.

^[2] Zhou, W., Stenhouse, M.J., Arthur, R., Whittaker, S., Law, D.H.-S., Chalaturnyk, R., and Jazrawi, W., 2004. The IEA Weyburn CO₂ Monitoring and storage project - modeling of the long-term migration of CO₂ from Weyburn. In Rubin, E.S., Keith, D.W., and Gilboy, C.F., (Eds), Proceedings of 7 the International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. I., pp.721-730.

ラックス)の時系列変化を計算した。その結果に基づくと、フラックスは圧入直後に急激に増加し、およそ100年後に最大値を示した後に減少傾向が認められる。また、直後に急減する例(RUN)も顕著である(第4.2-5図)。

以上より、貯留量の1%が漏出開始直後の最大のフラックスで全て漏出してしまうというのが最も危険側での想定となる。そこで、貯留量の1%が1年で漏出する高い漏出フラックスを想定し、1%漏出ケースのフラックスとした。



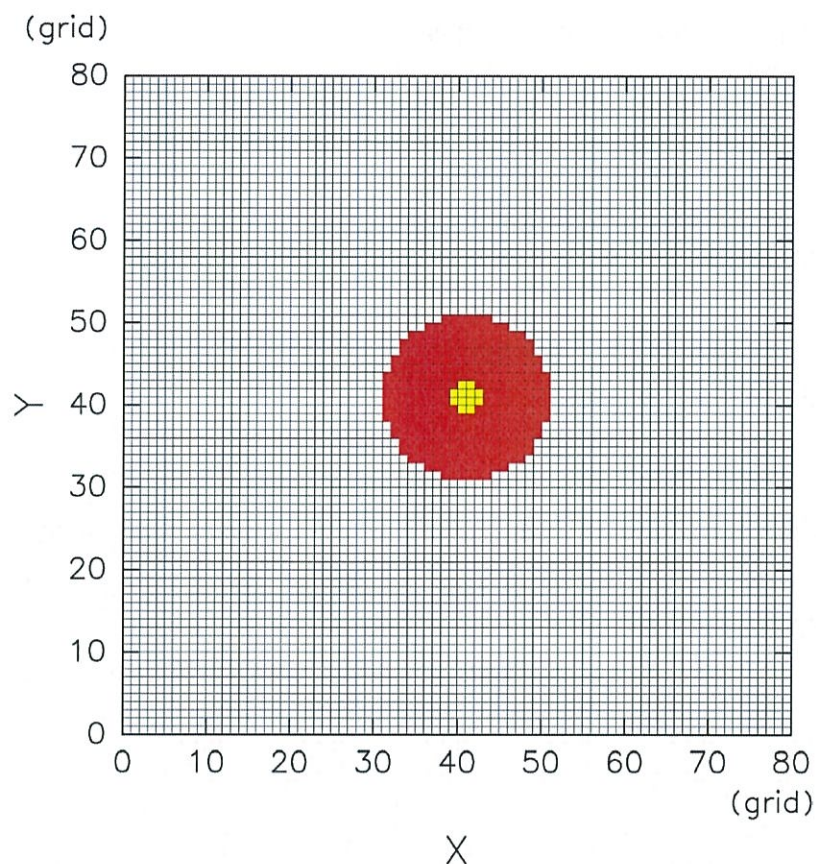
注: 出典: Zhou et al. (2004)^[1]

第4.2-5図 CO₂漏出レート(フラックス)の時系列変化

② 漏出域

漏出域は、円形に設定した(第4.2-6図)。断層からの漏出を仮定したものであれば、線状の漏出域になる可能性があるが、線上では向き依存性が生じる。例えば、東西流が卓越しているような場合に、線状の漏出域を東西向きにするか南北向きにするかでCO₂の濃度分布結果が変わる可能性がある。しかし、円形ならそういう可能性がない。また、漏出したCO₂は移行挙動シミュレーションの上面から海底堆積層を通して海水に到達する間に広がる可能性があり、線上の断層から漏出したとしても、必ずしも線状で海底(海底堆積層上面)に達するとは限らない。これらの理由により、円形の漏出域を設定するのは妥当だと考えられる。

円形漏出域の直径は、シナリオ2ケースと1%漏出ケースについて500mと100mの2ケースを行った。ここでは、それぞれ「500mケース」、「100mケース」と記した。また、この漏出域の直径と前項の漏出量を合わせて、例えば1%漏出ケースの500mケースであれば「1%漏出-500mケース」のように記した。



注：赤が直径 500m の円形漏出域の場合，黄色が直径 100m の円形漏出域の場合の漏出セル。

第 4. 2-6 図 Full-3D モデル領域 (2km×2km) の CO₂ 漏出域

③ 季節

シミュレーションは夏季と冬季の 2 季節について行った。夏季は 2008 年 8 月の境界条件データを用い，冬季は 2003 年 2 月の境界条件データを用いた。2 季節を選んだのは，海の状態が夏季と冬季で両極端となるためである。夏季は水温が高く強く成層している。一方，冬季は水温が低く成層がほとんどない。第 4. 2-2 図や第 4. 2-3 図に示されているとおり，水深 20m 程度の浅い海域では冬季は強く鉛直に混合されており海底から海面までほぼ同じ水温，塩分になる。夏季（8 月）は海面と海底の水温差が約 4℃となり，上下混合が起きにくい。また，夏季は最も低温の海底付近でも水温は約 18℃で，冬季（2 月）の約 3℃に比べると非常に高い。気体の CO₂ の溶解は水温に大きく依存するので，季節間での水温の違いも重要な因子である。

④ シミュレーションケース

上記①～③の組み合わせによりシミュレーションは 8 ケース行った。また，漏出による CO₂ 濃度の増加量を求めるためにバックグラウンドとなる CO₂ 無漏出シミュレーションも行った。したがって，下記 10 ケースの計算を行った。

1. シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件
2. シナリオ 2-100m ケース, 冬季条件
3. シナリオ 2-500m ケース, 夏季条件
4. シナリオ 2-500m ケース, 冬季条件
5. 1%漏出-100m ケース, 夏季条件
6. 1%漏出-100m ケース, 冬季条件
7. 1%漏出-500m ケース, 夏季条件
8. 1%漏出-500m ケース, 冬季条件
9. 無漏出ケース, 夏季条件
10. 無漏出ケース, 冬季条件

単位面積当たりの気相 CO₂ の漏出量は, シナリオ 2-100m ケースが $2.33 \times 10^{-6} \text{kg/m}^2/\text{s}$, シナリオ 2-500m ケースが $8.86 \times 10^{-8} \text{kg/m}^2/\text{s}$, 1%漏出-100m ケースが $2.54 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2/\text{s}$, 1%漏出-500m ケースが $9.63 \times 10^{-7} \text{kg/m}^2/\text{s}$ である。

CO₂ 漏出シミュレーションは, 静水圧モデル単体で 90 日計算 (スピニングアップ) した状態を初期値とした。

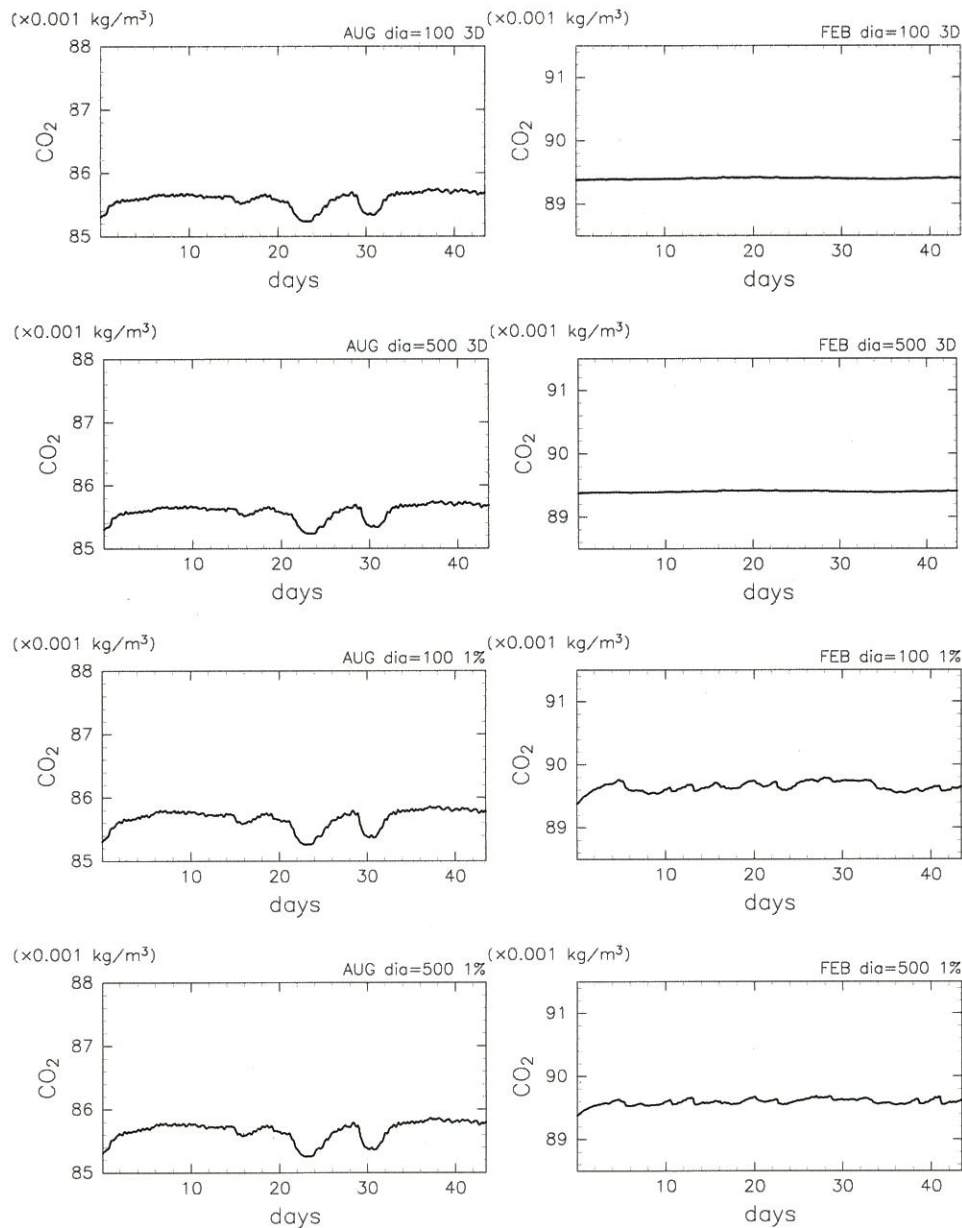
4.3 シミュレーション結果

(1) 潜在的環境影響評価項目

第3-1表に示した潜在的海洋環境影響調査項目のうち、CO₂が海水中に漏出した際に直接的な影響が及ぶと考えられるのは、水環境については炭酸系の項目（水素イオン濃度指数、全炭酸、アルカリ度、pCO₂）であり、その他の調査項目は直接的な影響がでるとは考えにくい。海底環境については炭酸系の項目への直接的影響の知見が極めて乏しく、明瞭な影響評価が困難と考えられる。海洋生物については、浮遊生物は水塊の移動に伴って季節的に大きく種組成が変化すること、海草および藻類は現存量が極めて小さいこと、さんご類は生息していないことから、これらの影響評価は困難である。したがって、影響評価の対象として魚類等遊泳動物および底生生物を選定した。生態系については、産卵場または生育場として当該海域を利用している重要な生物は魚類等遊泳動物および底生生物であり、藻場および干潟は極小域しか認められず、さんご群集その他の脆弱な生態系は認められない。また、熱水生態系その他の特殊な生態系は、当該海域に存在しない。さらに、海洋の利用等については、海洋レクリエーション、海中公園その他の自然環境の保全を目的として設定された区域、漁場、主要な航路、港湾区域および港域、海底ケーブルの敷設、海底資源の探査または掘削その他としての利用について調査を行った。漁場としての利用については、魚類等遊泳動物および底生生物を対象として漁業が行われていることから、魚類等遊泳動物および底生生物を環境影響評価項目とすることで対応する。その他の項目については、海洋レクリエーションの場として公園等が存在することや、自然環境の保全を目的として設定された区域として、陸上における自然公園等が存在すること等が確認されているが、ここで検討した極端に危険側のCO₂漏出であっても、海底の漏出地点から水平方向に500m、垂直方向には海面までの範囲において、pCO₂が最大で100 μ atm上昇する程度（第4.4-2図～第4.4-4図参照）であることや、海水中から大気へ微量のCO₂が出た場合においても、大気中では海水中に比べてCO₂は急速に拡散することから、ヒトや人間活動に直接的な影響を与えないレベルであると考えられる。したがって、潜在的環境影響評価項目は水環境における炭酸系の項目および海洋生物（魚類等遊泳動物および底生生物）に焦点を絞り、その影響評価を行った。海水中の炭酸系の項目のうちpCO₂は海洋生物への影響を評価する際に有用となるので、この解析を主に行った。

(2) 溶存CO₂

海水中のCO₂濃度は漏出開始後時間とともに継続的に高くなっていくわけではなく、およそ7日以内でほぼ平衡状態に達する（第4.3-1図）。ただし、その後も変化する危険性を考え、平均値等の算出には平衡状態に達している漏出開始後22日～43日の3週間を採用した。以下で「3週間」という記載はこの3週間を意味するものとする。なお、ここに示す図、結果はFull-3Dモデルの結果である。



注: 上から順にシナリオ 2-100m ケース, シナリオ 2-500m ケース, 1%漏出-100m ケース, 1%漏出-500m ケース。それぞれ左が夏季条件, 右が冬季条件。夏季と冬季のグラフは縦軸の値が異なっているが, 縦軸の最大値と最小値の差は同じ (0.003kg/m³)。

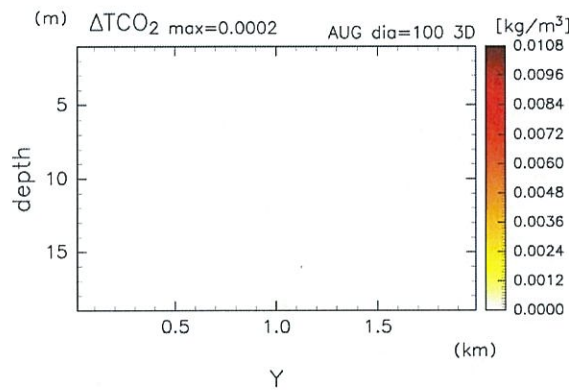
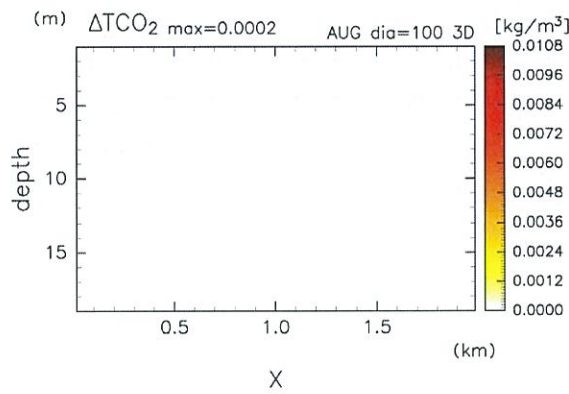
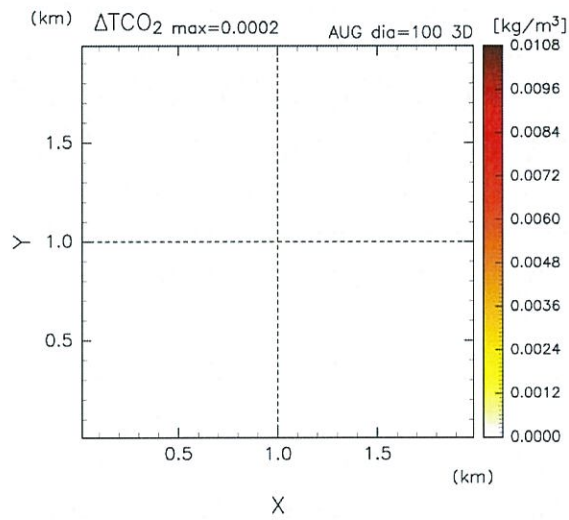
第 4.3-1 図 Full-3D モデル全領域で平均した溶存 CO₂ 濃度の時系列

第 4.3-1 図は, シナリオ 2 ケース全領域で平均した溶存 CO₂ 濃度の時系列である。ここでは溶存 CO₂ 濃度は全炭酸 (TCO₂) 量で示している。いずれのケースも, 夏季, 冬季ともに漏出直後から溶存 CO₂ 濃度が増加していくが, どのケースもおおよそ 7 日以内に増加が止まり以降はほぼ平衡状態に達している様子が見られる。夏季と冬季で溶存 CO₂ 濃度が異なっているのは, 夏季は冬季に比べて水温が高く CO₂ ガスが溶解しにくいためである。気体は水温が低くなると水への溶解度が上がるため, 漏出のない自然状態においても夏季よりも冬季の方が溶存 CO₂ 濃度は高くなる。シナリオ 2-100m ケース, 500m ケースとも, 冬季ケースはほぼ一定値なのに対し夏季ケースでは変動が見られる。これらの変動は, 1%漏出ケースでも大きさは異なるものの同じタイミングで見られることから, 風によって起こされる流れによるもの

と考えられる。また、1%漏出-100m ケースと 500m ケースに大きな違いが見られないことから、漏出域の広さの影響は 2km×2km の領域全体を考えた場合には小さいことが示唆される。

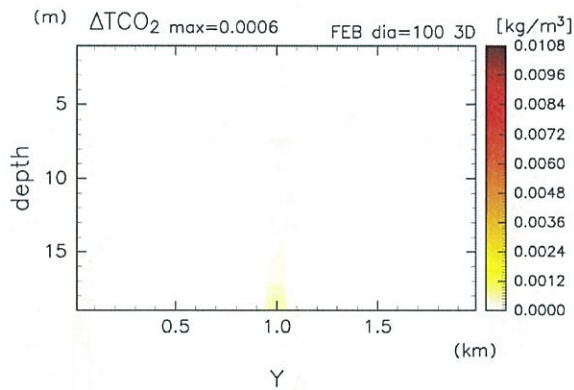
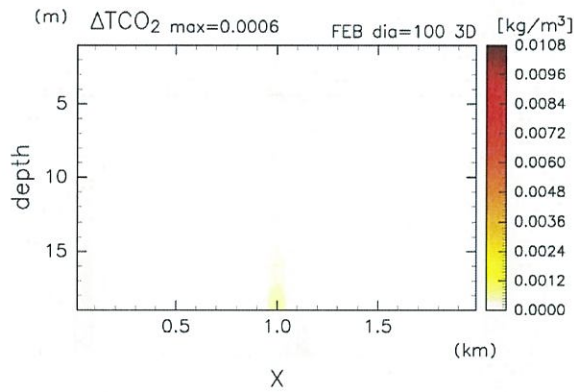
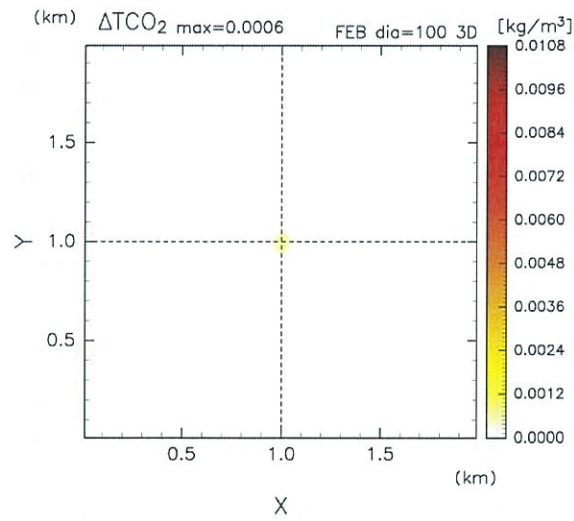
上述のとおり、溶存 CO₂ の濃度は水温依存性が大きいいため、漏出 CO₂ がなくても夏季と冬季では溶存 CO₂ 濃度が大きく異なる。そのため、溶存 CO₂ の分布からだけでは漏出による濃度増加やその影響範囲がはっきりしない。そこで、各シミュレーションケースの溶存 CO₂ 濃度の 3 週間平均から同じ季節条件で行った無漏出シミュレーションの溶存 CO₂ 濃度の 3 週間平均を引いた差、すなわち漏出による溶存 CO₂ 濃度の増分 (ΔTCO_2) を示した (第 4.3-2 図~第 4.3-7 図)。

シナリオ 2-100m ケースは、冬季 (第 4.3-3 図) は漏出域付近で ΔTCO_2 が高くなっているが、夏季 (第 4.3-2 図) はこの図のカラースケールではほとんど色につかない程度にしかない。シナリオ 2-500m ケースは夏季、冬季とも漏出による TCO_2 の増加が極めて小さく、このカラースケールでは色につかないため図は省略した。1%漏出-100m ケース (第 4.3-4 図, 第 4.3-5 図) は漏出域付近で ΔTCO_2 が大きい漏出域から離れると急速に小さくなる。1%漏出-500m ケース (第 4.3-6 図, 第 4.3-7 図) も漏出域付近で ΔTCO_2 が高くなっているが、増加量は非常に小さい。いずれのケースにおいても同じ漏出量・漏出率の場合、夏季に比べて冬季の溶存 CO₂ 濃度増分が大きい。これは、漏出した気相 CO₂ が海水温度の低い冬季の方が夏季よりも海水によく溶けるためと考えられる。



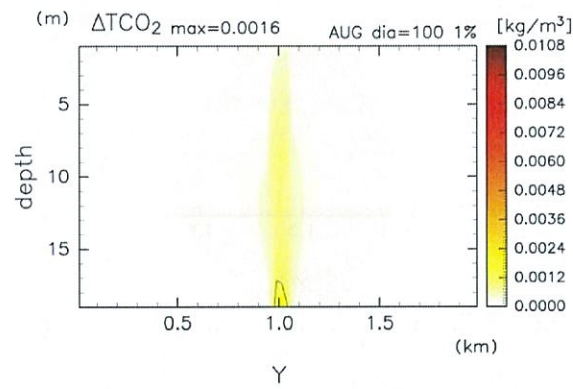
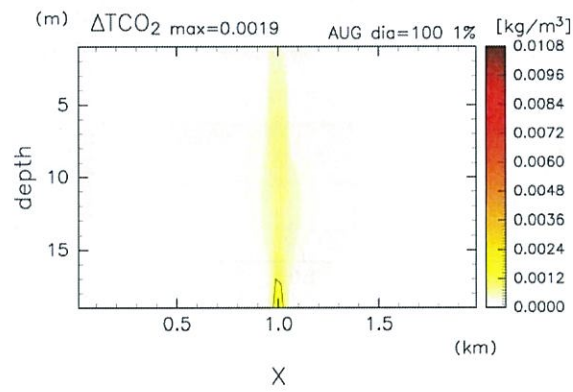
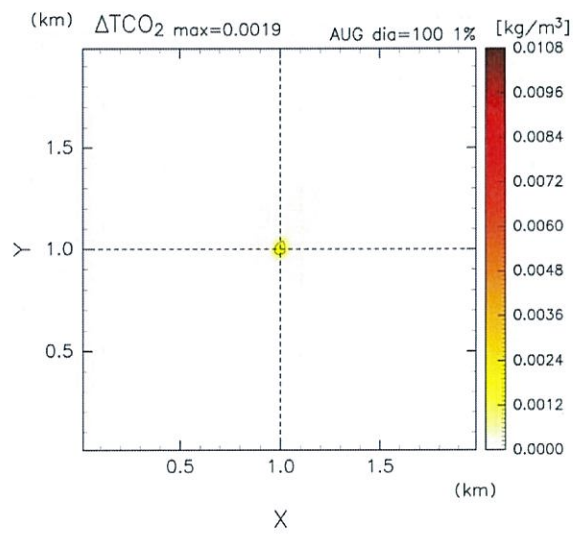
注：上から順に最下層の水平面（xy 平面）と y, x の中央での鉛直断面（xz 断面, yz 断面）。
 シナリオ 2-100m ケース, 夏季条件。

第 4.3-2 図 CO₂ 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO₂ 濃度の
 3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図



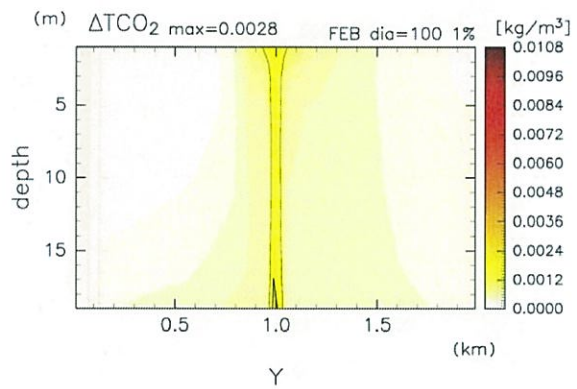
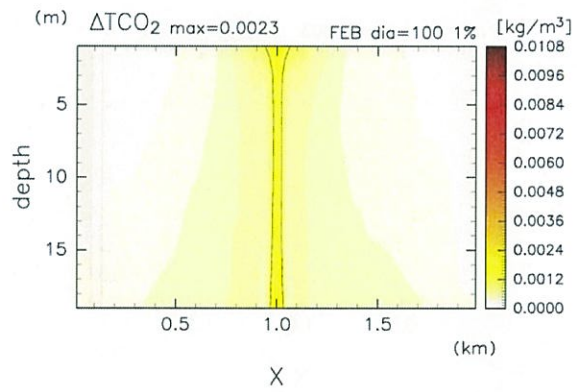
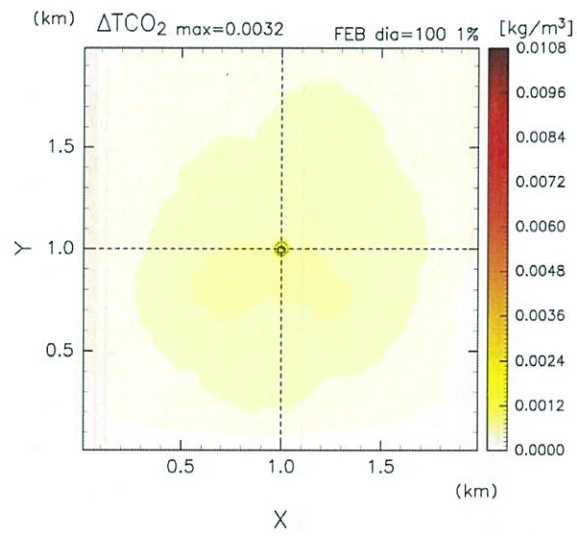
注：第 4.3-2 図と同じ。シナリオ 2-100m ケース，冬季条件。

第 4.3-3 図 CO₂ 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO₂ 濃度の 3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図



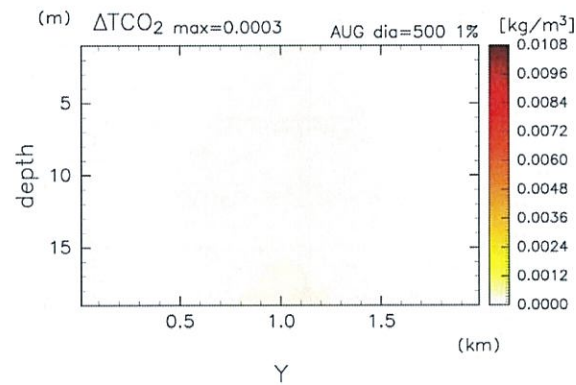
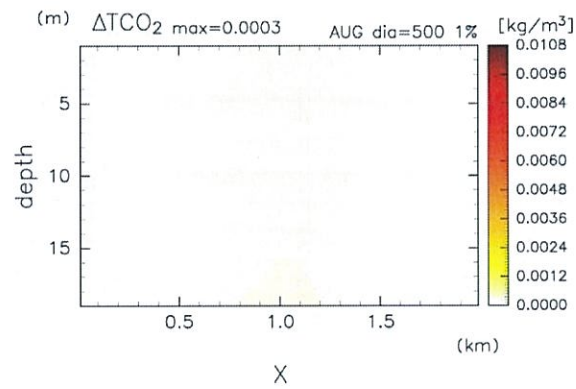
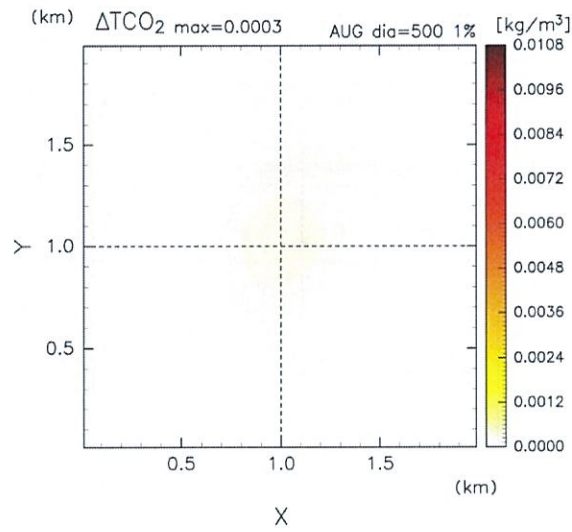
注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-100m ケース，夏季条件。

第 4.3-4 図 CO₂ 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO₂ 濃度の 3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図



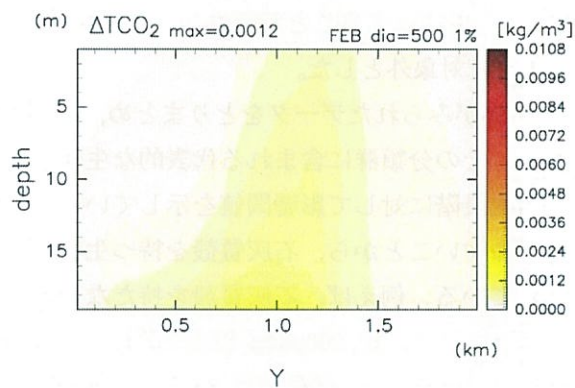
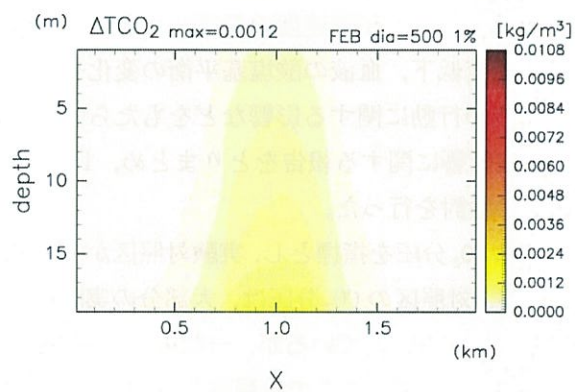
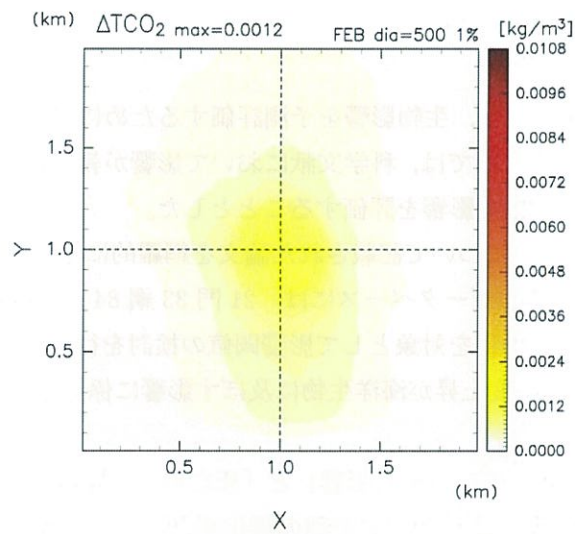
注：第 4. 3-2 図と同じ。1%漏出-100m ケース，冬季条件。

第 4. 3-5 図 CO₂ 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO₂ 濃度の 3 週間平均値の差 (ΔTCO₂) の分布図



注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-500m ケース，夏季条件。

第 4.3-6 図 CO₂ 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO₂ 濃度の 3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図



注：第 4.3-2 図と同じ。1%漏出-500m ケース，冬季条件。

第 4.3-7 図 CO₂ 漏出ありケースとなしケースの溶存 CO₂ 濃度の 3 週間平均値の差 (ΔTCO_2) の分布図

4.4 海洋生物への影響の予測方法

(1) 生物影響閾値の設定

万が一のCO₂漏出を仮定し、生物影響を予測評価するためには、海洋生物に及ぼすCO₂影響の指標値が必要となる。ここでは、科学文献において影響が報告されている最も低いCO₂分圧(pCO₂)を採用し、安全側で影響を評価することとした。

CO₂が生物に与える影響について記載された論文を網羅的に検索、解析して、生物影響データベースを構築した。このデータベースには、21門33綱84目143科246種の情報が収録されており、広範な海洋生物種を対象として影響閾値の検討を行った。なお、データベースは、環境省が「海水中のCO₂濃度上昇が海洋生物に及ぼす影響に係る知見」として公開している資料^[1]を参照して構築した。

生物に対するCO₂の影響は、「死亡影響」と「死亡以外の影響」に分けて考えることができる。「死亡影響」は、生物個体の死亡や卵の孵化率低下などを通じて、直接的に個体群の減少を招く。「死亡以外の影響」は、繁殖速度の低下など個体群の再生産能力に係る影響、石灰質の殻形成不全・形成速度低下、血液の酸塩基平衡の変化や耳石形成不全などの生理的な影響、帰巢能力や逃避などの行動に関する影響などをもたらす。ここでは、致死作用あるいは成長阻害など個体の生残影響に関する報告をとりまとめ、14門21綱93種についての報告をもとに、生物影響閾値の検討を行った。

生物影響閾値に関してはCO₂分圧を指標とし、実験対照区からのCO₂分圧の増加分(ΔpCO_2)として取りまとめた。なお、対照区のCO₂分圧は、大部分の実験において380~400 μ atm(現在の平均的な海洋表層の値)が採用されているが、一部の実験では産業革命以前のCO₂分圧であるおよそ280 μ atmが採用されている。ここでは現在の状況においてCO₂が漏出した場合を想定するので、現在のCO₂分圧を基準にすることが望ましい。したがって、産業革命以前のCO₂分圧を対照区とした実験結果は対象外とした。

CO₂分圧の上昇により影響がみられたデータをとりまとめ、分類群ごとに整理した(第4.4-1表)。表中には、分類群、その分類群に含まれる代表的な生物の一般名、石灰質殻の有無、実験に用いた生物の生活史段階に対して影響閾値を示している。これらの生物の中で、石灰質は酸性に傾くと溶解しやすいことから、石灰質殻を持つ生物種は酸性化に対する耐性が低いことが一般的に知られている。例えば、石灰質殻を持たない水産上重要な魚類では、トウゴロウイワシ稚魚の一例をのぞき、10,000 μ atm以上の影響閾値を示す。また、タコやイカも同様に耐性が高く、成体で9,600 μ atm、幼体では38,000~84,000 μ atmであった。一方、石灰質殻を持つ生物としては、コケムシ、サンゴ類、ヒトデやウニなどの棘皮動物、二枚貝や巻貝、有孔虫、一部のハプト藻やサンゴモが知られているが、生物影響閾値はコケムシでは1,000 μ atm、サンゴ類では310~1,700 μ atm、ウニでは200~79,000 μ atm、二枚貝では300~1,300 μ atm、巻貝では200~2,400 μ atmが得られており、石灰質殻を持つ生物は相対的にCO₂の濃度上昇に弱いことがわかる。

^[1] 『海水中のCO₂濃度上昇が海洋生物に及ぼす影響に係る知見』(環境省ウェブサイト：
https://www.env.go.jp/water/kaiyo/ccs/eikyo_db/database.htm, 2014/10/21 アクセス)

これらの中で最も影響閾値が低い値は、棘皮動物門ウニ綱に含まれるバフンウニとナガウニ、および軟体動物門腹足綱に含まれるマガキガイを用いた実験で得られた 200 μ atm であった。いずれも 6 ヶ月にわたる飼育実験による影響を示したもので、これは慢性的な影響であることから、報告された文献の中で最も低い値といえる。

この結果、生物影響を検討するにあたり、CO₂分圧の増加量 ($\Delta p\text{CO}_2$) として 200 μ atm を生物影響閾値として採用した。

第 4.4-1 表 CO₂ 分圧上昇による生物影響のまとめ 一分類群別の生物種の影響閾値一

門	綱	代表的な生物	石灰質殻の有無	生活史段階	影響閾値 ($\Delta p\text{CO}_2 \mu\text{atm}$)	備考
Amnelida (環形動物門)	Polychaeta (多毛綱)	ゴカイ等		—	—	実験で影響みとめられず (pH データのみ。およそ2,000と推察)
	Arthropoda (節足動物門)			卵 幼生 成体	620* 910-140,000 620**・59,000	高濃度では短時間で、低濃度では長時間で生残率が低下 *ナンキョクオキアミ 卵孵化率低下 **イソスジエビ 30週間飼育
Arthropoda (節足動物門)	Malacostraca (軟甲綱)	エビ、カニ、ロブスター、オキアミ等		幼生 成体	4,900 580*・58,000	高濃度では短時間で、低濃度では長時間で生残率が低下 *フジツボ 104日間飼育
	Maxillopoda (顎脚綱)	ミジンコ類、フジツボ類		幼生 成体	— 1,000	
Bryozoa (外肛動物門)	Gymnolaemata (裸喉綱)	コケムシ	○	—	—	
Chordata (脊索動物門)				卵	50,000-120,000	
				胚	18,000	
				稚仔魚	240*	
		硬骨魚類の殆ど (キス、アジ、イワシ、ヒラメ等)		幼魚/ 若魚 成体	24,000-100,000 30,000-59,000 30,000-50,000	*トウゴロウイワシ:8日間曝露で生残率減少
		軟骨魚類(サメ、エイ等)		成魚	68,000	
Chidaria (刺胞動物門)	Elasmobranchii (板鰐綱)			成魚	—	*8週間飼育で白化増加
	Anthozoa (花虫綱)	イソギンチャク、サンゴ類	○	—	310*・1700	
Echinodermata (棘皮動物門)	Scyphozoa (鉢虫綱)	クラゲ類		幼生	—	実験で影響みとめられず(～50,000)
	Asterozoa (ヒトデ綱)	ヒトデ類	○	幼生 成体	— —	実験で影響みとめられず(～400)
				成体	—	実験で影響みとめられず(～2,800)
				幼生	900・79,000	
		Echinozoa (ウニ綱)	ウニ類	○	幼生 幼体	200
	Ophiurozoa (クモヒトデ綱)	クモヒトデ類	○	幼生	300	

注: この表は、268 編の文献から、14 門 21 綱 93 種の海洋生物の影響閾値についてまとめたデータベースに基づく。

第 4.4-1 表 (つづき) CO₂ 分圧上昇による生物影響のまとめ 一分類群別の生物種の影響閾値一

門	綱	代表的な生物	石灰質殻の有無	生活史段階	影響閾値 (ΔpCO ₂ μ atm)	備考
Mollusca (軟体動物門)	Bivalvia (二枚貝綱)	二枚貝(アサリ、カキ、ウバガイなど)	○	幼生	300-520	
				稚貝	350-1,300	
				成体	590	
	Cephalopoda (頭足綱)	タコ、イカ等		幼体	38,000-84,000	
				成体	9,600	
	Gastropoda (腹足綱)	巻貝(サザエ、アワビ等)	○	幼生	610-700	
稚貝				200	マカキガイ <i>Strombus luhuanus</i> 曝露期間6ヶ月 生残率減少	
			成体	2,400		
Sipuncula (星口動物門)	Sipunculidea (スジホシムシ綱)		△	-	9,700	
Foraminifera (有孔虫門)	Polythalamia	有孔虫類 (石灰質殻をもつ原生動物)	○	-	740	
Chlorophyta (緑藻植物門)	Bryopsidophyceae	アオサ、ハネモ、ミルなどの海藻		-	2,100	
Haptophyta (ハプト植物門)	Prymnesiophyceae (ハプト藻綱)	植物プランクトン	○(一部の種)	-	-	実験で影響みとめられず(~520)
Rhodophyta (紅色植物門)	Florideophyceae (真正紅藻綱)	サンゴモ等	○(一部の種)	-	550-890	
Myxozoa (渦鞭毛藻植物門)	Peridinea (渦鞭毛藻綱)	植物プランクトン、共生褐虫藻(クラゲ、インゲンチャク、サンゴ等)		-	-	実験で影響なし(~1,700)

注: この表は, 268 編の文献から, 14 門 21 綱 93 種の海洋生物の影響閾値についてまとめたデータベースに基づく。

(2) CO₂ 漏出シミュレーションによる pCO₂ の増分 (ΔpCO₂)

① ΔpCO₂

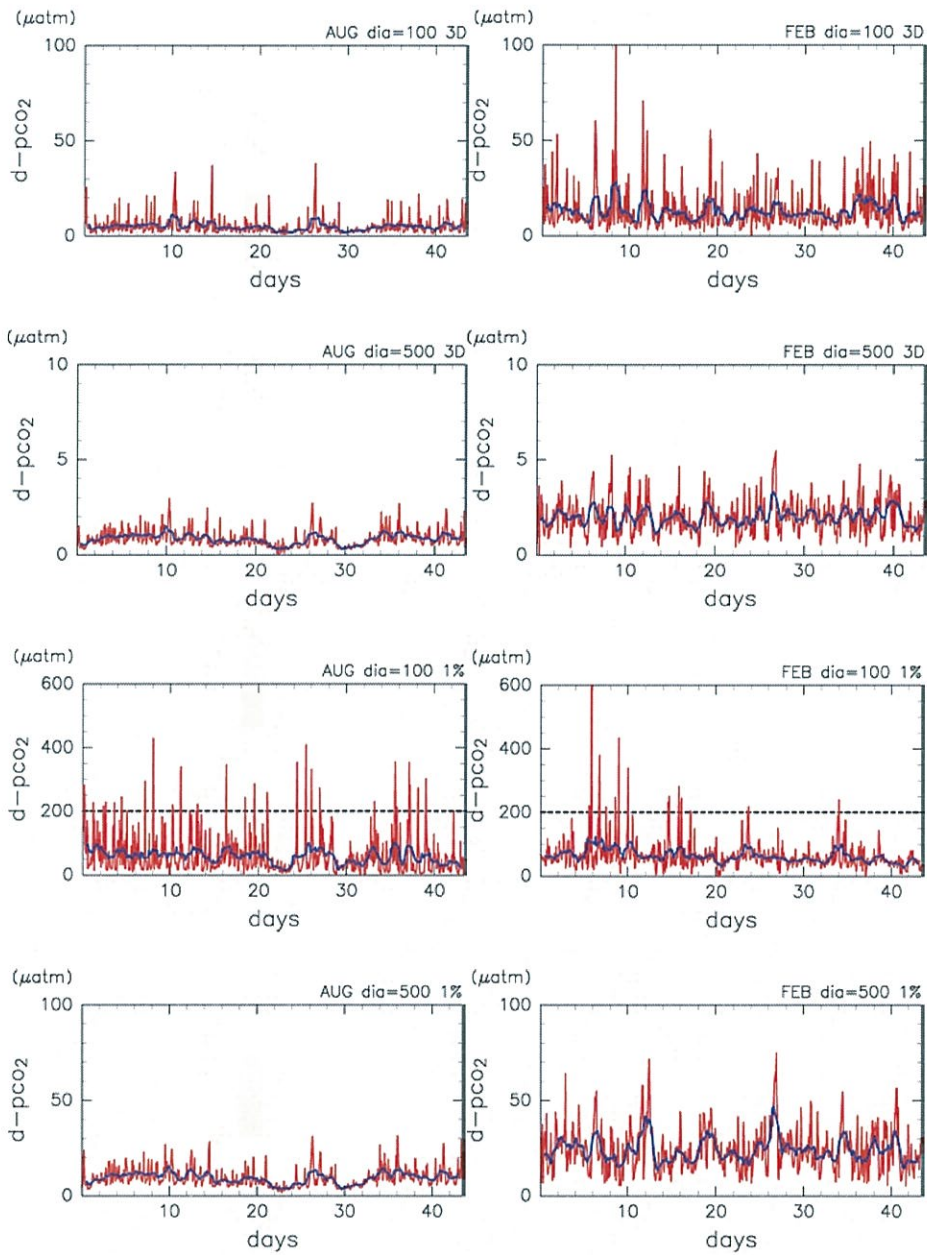
pCO₂ は、海水中の二酸化炭素分圧である。4.4 節のとおり、漏出 CO₂ の海洋生物への影響の有無は、CO₂ 漏出による pCO₂ の増分、すなわち ΔpCO₂ で見積られる。ΔpCO₂ が 200μatm 以上になると影響を受ける生物種が存在する。そこで、ΔpCO₂=200μatm を漏出 CO₂ が海洋生物に与える 1 つの目安と考えた。ここでは ΔpCO₂ を、漏出ありのシミュレーションの pCO₂ と漏出なしのシミュレーションの pCO₂ の差と定義する。

第 4.4-1 図は、漏出域の中心の最下層セル (海底直上) における ΔpCO₂ の時系列である。赤線は生データ、青線は 24 時間の移動平均で、点線は生物が影響を受け得る目安である ΔpCO₂=200μatm である。01 分潮の効果を打ち消すことを考えると 25 時間移動平均にすべきであるが、苫小牧港潮流観測調査業務報告書によると、P1 分潮、K1 分潮が卓越しているため、生物影響の予測に影響は生じないと考えられる。

シナリオ 2 の場合、ΔpCO₂ はもっとも高い値をとる 100m ケースの冬季でもほとんどの時間で 50μatm 以下であり、24 時間平均すると 30μatm 以下である。100m ケースの夏季は最大値が 50μatm 未満で、24 時間平均値はほとんどの時間で 10μatm 以下である。500m ケースは夏季、冬季ともにほとんどの時間において 5μatm 以下で非常に小さい値にしかない。1%漏出-100m ケースは、夏季、冬季ともシミュレーション期間中に数回 200μatm を超えるが、24 時間平均すると概ね 100μatm 以下である。1%漏出-500m ケースは冬季でも最大値が 80μatm 以下で、夏季は概ね 30μatm 以下と pCO₂ の増加は非常に小さい。

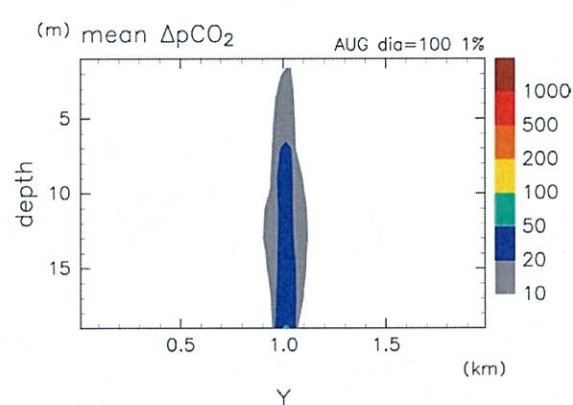
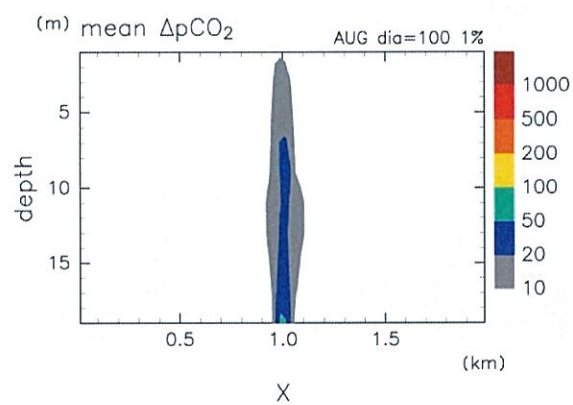
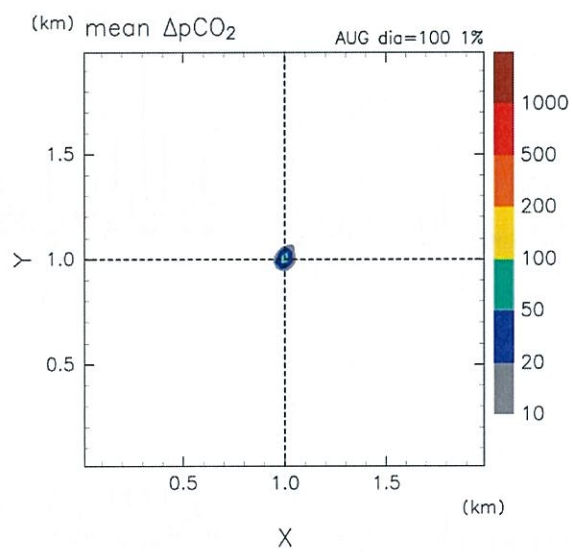
今回グラフとして示したこの時系列のセルは、漏出域が 500m の場合、周囲 8 セル全てが漏出域のセルで囲まれており、非漏出域のセルまで十分離れている。それに対し漏出域が 100m のケースは漏出セル数が 12 個しかいないため、この時系列グラフに用いたセルの周囲 8 セルの 1 つは非漏出域のセルになってしまう (第 4.2-6 図)。1%漏出-100m ケースにおいて単位面積当たりの漏出量があまり高い値にならないことや、1%漏出-500m ケースほど夏季と冬季の違いがはっきりしないのは、周囲の非漏出域から CO₂ 濃度の低い水が混ざり込みやすいことが影響していると考えられる。

第 4.4-2 図~第 4.4-4 図は、3 週間平均した ΔpCO₂ の分布図である。シナリオ 2-100m ケースの冬季では、領域内最大値が 13μatm であるが、他のケースは最大値が 10μatm 未満である (第 4.3-1 表)。1%漏出-100m ケース (第 4.4-2 図, 第 4.4-3 図) は、冬季の漏出域直上でも 100μatm を超えることはなく、夏季は漏出域直上でも 50μatm をわずかに超える程度である。1%漏出-500m ケースの冬季 (第 4.4-4 図) は、漏出域の海底付近に 20μatm を超えるところがわずかにある程度である。夏季は最大値が約 9μatm (第 4.3-1 表) と漏出域直上ですら非常に小さい値である。なお、シナリオ 2 ケースおよび 1%漏出-500m ケースの夏季については、ここで示したカラースケールではコンターが描かれないため、図を省略した。



注：上から順にシナリオ 2-100m ケース，シナリオ 2-500m ケース，1%漏出-100m ケース，1%漏出-500m ケース。左が夏季条件，右が冬季条件。赤は生データ，青は 24 時間移動平均したもの。点線は生物影響の目安である $\Delta pCO_2 = 200\mu\text{atm}$ 。

第 4.4-1 図 漏出域中心の最下層セル（海底直上）の ΔpCO_2 の時系列



注：上から順に最下層の水平面 (xy 平面) と y, x の中央での鉛直断面 (xz 断面, yz 断面)。1%漏出-100m ケース, 夏季条件。

第 4. 4-2 図 $\Delta p\text{CO}_2$ の分布図